



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ  
& ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (ΣΕΤ)  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΟΛΕΩΝ ΚΑΙ ΚΤΙΡΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«Διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων  
μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων στην  
ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων μετρήσεων  
από επίγειους σταθμούς»

Κορεντζέλου Ασημίνα

Επιβλέπουσα: Λιώρα Ναταλία

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων  
μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων στην  
ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων μετρήσεων  
από επίγειους σταθμούς»

«Κορεντζέλου Ασημίνα»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Λιώρα Ναταλία

«ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο»

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Γαρείου Ζωή

«ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο»

Πάτρα, Ιούλιος 2026

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα Λιώρα Ναταλία, για την πολύτιμη βοήθεια και την  
εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής εργασίας.*

*Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για όλη την  
υποστήριξη.*

## Περίληψη

Η Διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης, αξιοποιώντας ωριαία δεδομένα από το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας για την περίοδο 2001–2024 (CO) και 2017–2024 (PM10). Το μονοξείδιο του άνθρακα αποτελεί έναν πρωτογενή αδρανή ατμοσφαιρικό ρύπο που προέρχεται κυρίως από ατελείς καύσεις, με σημαντικότερη πηγή την οδική κυκλοφορία αλλά και την καύση βιομάζας. Αντίθετα, τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν έναν σύνθετο ρύπο, οι συγκεντρώσεις του οποίου επηρεάζονται τόσο από πρωτογενείς εκπομπές όσο και από δευτερογενείς διεργασίες σχηματισμού. Για κάθε σταθμό υπολογίστηκαν περιγραφικά στατιστικά (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, διασπορά), ενώ εξετάστηκε η προσαρμογή των εμπειρικών δεδομένων στην κανονική κατανομή και στην κατανομή Gamma με χρήση του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , του στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$  και γραφικών απεικονίσεων μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών κατανομών. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της εποχικότητας μέσω του διαχωρισμού των δεδομένων σε θερμή και ψυχρή περίοδο, καθώς και η χωρική μεταβλητότητα μεταξύ των σταθμών μέτρησης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι συγκεντρώσεις των δύο ρύπων εμφανίζουν σημαντική ασυμμετρία και διαφοροποιήσεις ως προς τη χωρική και χρονική κατανομή τους, ενώ η κατανομή Gamma περιγράφει γενικά αποτελεσματικότερα τις εμπειρικές κατανομές σε σχέση με την κανονική κατανομή. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις διεργασίες που καθορίζουν την ποιότητα αέρα στην πόλη της Θεσσαλονίκης και να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης και την υποστήριξη της περιβαλλοντικής διαχείρισης.

## Λέξεις – Κλειδιά

ατμοσφαιρική ρύπανση, στατιστική κατανομή, κανονική κατανομή, gamma κατανομή, CO, PM10, Θεσσαλονίκη

## «Investigation of the statistical distribution of carbon monoxide and particulate matter concentrations in the atmosphere of Thessaloniki using ground-based measurement data»

Asimina Korentzelou

### Abstract

The Diploma thesis focuses on investigating the statistical distribution of carbon monoxide (CO) and particulate matter (PM10) concentrations in the atmosphere of Thessaloniki, utilizing hourly data from the network of monitoring stations of the Ministry of Environment and Energy for the period 2001–2024 (CO) and 2017–2024 (PM10). Carbon monoxide is a primary inert air pollutant that originates mainly from incomplete combustion, with the most important source being road traffic and biomass combustion. In contrast, particulate matter is a complex pollutant, the concentrations of which are affected by both primary emissions and secondary formation processes. Descriptive statistics (mean, standard deviation, variance) were calculated for each station, while the fit of the empirical data to the normal distribution and the Gamma distribution was examined using the coefficient of determination  $R^2$ , the chi-square  $\chi^2$  and graphical representations between observed and theoretical distributions. In addition, the effect of seasonality was investigated by separating the data into warm and cold periods, as well as the spatial variability between the measurement stations. The results show that the concentrations of the two pollutants show significant asymmetry and differences in their spatial and temporal distribution, while the Gamma distribution generally describes the empirical distributions more effectively than the normal distribution. The aim of this work is to draw useful conclusions about the processes that determine air quality in the city of Thessaloniki and to use them to improve forecasting models and support environmental management.

### Keywords

air pollution, statistical distribution, normal distribution, gamma distribution, CO, PM10, Thessaloniki

## Περιεχόμενα

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Περίληψη.....                                                                                                                                                                                     | v   |
| Abstract .....                                                                                                                                                                                    | vi  |
| Περιεχόμενα .....                                                                                                                                                                                 | vii |
| Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων .....                                                                                                                                                                | ix  |
| Κατάλογος Πινάκων .....                                                                                                                                                                           | x   |
| Κατάλογος Διαγραμμάτων.....                                                                                                                                                                       | xi  |
| Σημαντικότερα σημεία της εργασίας (Highlights).....                                                                                                                                               | 1   |
| Συνεισφορά της εργασίας.....                                                                                                                                                                      | 2   |
| Εισαγωγή.....                                                                                                                                                                                     | 3   |
| Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....                                                                                                                                           | 5   |
| 1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση .....                                                                                                                                                                    | 5   |
| 1.2 Πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....                                                                                                                                                             | 5   |
| 1.3 Ατμοσφαιρικοί ρύποι .....                                                                                                                                                                     | 6   |
| 1.4 Περιγραφή των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων.....                                                                                                                                             | 6   |
| 1.4.1 Οξείδια του θείου .....                                                                                                                                                                     | 6   |
| 1.4.2 Οξείδια του αζώτου.....                                                                                                                                                                     | 7   |
| 1.4.3 Όζον .....                                                                                                                                                                                  | 7   |
| 1.4.4 Αιωρούμενα σωματίδια.....                                                                                                                                                                   | 8   |
| 1.5 Σημασία της στατιστικής ανάλυσης των ατμοσφαιρικών ρύπων .....                                                                                                                                | 11  |
| 1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση προηγούμενων μελετών.....                                                                                                                                            | 12  |
| 1.7 Ερευνητικά ερωτήματα της Διπλωματικής εργασίας .....                                                                                                                                          | 13  |
| Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Μεθοδολογία διερεύνησης κατανομών ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων ..                                                                                                        | 15  |
| 2.1 Gamma Κατανομή .....                                                                                                                                                                          | 15  |
| 2.2 Κανονική Κατανομή .....                                                                                                                                                                       | 16  |
| 2.3 Περιγραφή του κριτηρίου καλής προσαρμογής ( $\chi^2$ ).....                                                                                                                                   | 17  |
| Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Μελέτη Περίπτωσης .....                                                                                                                                                 | 19  |
| 3.1 Περιοχή Μελέτης .....                                                                                                                                                                         | 19  |
| 3.2 Η ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης.....                                                                                                                                                            | 21  |
| 3.3 Συλλογή δεδομένων .....                                                                                                                                                                       | 22  |
| 3.4 Επεξεργασία δεδομένων .....                                                                                                                                                                   | 24  |
| 3.5 Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων CO κατά τη θερμή και ψυχρή περίοδο<br>την περίοδο 2001-2024 .....                                                                                        | 25  |
| 3.6 Εφαρμογή και Αξιολόγηση Κατανομών στα ωριαία δεδομένα CO της<br>ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2001-2024 .....                                                               | 29  |
| 3.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της κατανομής Gamma και<br>της Κανονικής κατανομής στα ωριαία δεδομένα CO της ατμόσφαιρας της<br>Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2001-2024..... | 49  |
| 3.8 Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων PM10 κατά τη θερμή και ψυχρή<br>περίοδο την περίοδο 2001-2024.....                                                                                       | 50  |
| 3.9 Εφαρμογή και Αξιολόγηση Κατανομών στα ωριαία δεδομένα PM10 της<br>ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2017-2024 .....                                                             | 54  |

|                                             |                                                                                                                                                                                            |    |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10                                        | Σχολιασμός των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της κατανομής Gamma και της Κανονικής κατανομής στα ωριαία δεδομένα PM10 της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2017-2024 ..... | 85 |
| 3.11                                        | Σύγκριση της προσαρμογής της κατανομής Gamma στα δεδομένα μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων .....                                                                         | 87 |
| Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Συμπεράσματα..... |                                                                                                                                                                                            | 89 |
| 4.1                                         | Αναπάντητα ερωτήματα.....                                                                                                                                                                  | 89 |
| 4.2                                         | Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....                                                                                                                                                      | 90 |
| Βιβλιογραφία.....                           |                                                                                                                                                                                            | 91 |

## Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης της Θεσσαλονίκης (πηγή: my Google maps) .....                                          | 19 |
| Εικόνα 2 Σταθμός Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην θέση Αγ. Σοφία (πηγή: Google maps) .....                                        | 22 |
| Εικόνα 3 Χάρτης σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (πηγή: ίδια επεξεργασία) ..... | 23 |
| Σχήμα 1 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gamma (πηγή: Wilks, 2011) .....                                                | 16 |
| Σχήμα 2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής (πηγή: Wilks, 2011) .....                                            | 17 |

## Κατάλογος Πινάκων

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1 Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας του ΕΔΠΑΡ (πηγή: ΥΠΕΝ).....             | 23 |
| Πίνακας 2 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων CO κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                       | 27 |
| Πίνακας 3 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων CO κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                       | 28 |
| Πίνακας 4 Πίνακας συντελεστών R2 και $\chi^2$ της κανονικής κατανομής και της gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις CO .....   | 29 |
| Πίνακας 5 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM10 κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                     | 52 |
| Πίνακας 6 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM10 κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                     | 53 |
| Πίνακας 7 Πίνακας συντελεστών R2 και $\chi^2$ της κανονικής κατανομής και της gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις PM10 ..... | 54 |

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Διάγραμμα 1 Χρονοσειρά μέσης τιμής CO κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                                                                                                        | 27 |
| Διάγραμμα 2 Χρονοσειρά μέσης τιμής CO κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                                                                                                        | 28 |
| Διάγραμμα 3 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                            | 30 |
| Διάγραμμα 4 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                                                         | 31 |
| Διάγραμμα 5 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....     | 32 |
| Διάγραμμα 6 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                                  | 32 |
| Διάγραμμα 7 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....     | 33 |
| Διάγραμμα 8 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                                  | 34 |
| Διάγραμμα 9 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                         | 34 |
| Διάγραμμα 10 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Αταυρούπολη) .....                                                     | 35 |
| Διάγραμμα 11 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σαυρούπολη) .....  | 36 |
| Διάγραμμα 12 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                              | 36 |
| Διάγραμμα 13 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) ..... | 37 |
| Διάγραμμα 14 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                              | 37 |
| Διάγραμμα 15 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό) .....                           | 38 |
| Διάγραμμα 16 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό) .....                                                        | 38 |

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Διάγραμμα 17 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό) .....  | 39 |
| Διάγραμμα 18 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό) .....                               | 39 |
| Διάγραμμα 19 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό) .....  | 40 |
| Διάγραμμα 20 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό) .....                               | 40 |
| Διάγραμμα 21 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος) .....                           | 41 |
| Διάγραμμα 22 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος) .....                                                        | 41 |
| Διάγραμμα 23 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος) .....    | 42 |
| Διάγραμμα 24 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος) .....                                 | 43 |
| Διάγραμμα 25 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος) .....    | 43 |
| Διάγραμμα 26 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος) .....                                 | 44 |
| Διάγραμμα 27 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά) .....                        | 45 |
| Διάγραμμα 28 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά) .....                                                     | 45 |
| Διάγραμμα 29 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά) ..... | 46 |
| Διάγραμμα 30 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά) .....                              | 47 |
| Διάγραμμα 31 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά) ..... | 47 |
| Διάγραμμα 32 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά) .....                              | 48 |

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Διάγραμμα 33 Χρονοσειρά μέσης τιμής PM10 κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                                                                                                    | 52 |
| Διάγραμμα 34 Χρονοσειρά μέσης τιμής PM10 κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης .....                                                                                                    | 53 |
| Διάγραμμα 35 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                        | 55 |
| Διάγραμμα 36 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία).....                                                      | 56 |
| Διάγραμμα 37 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) ..... | 57 |
| Διάγραμμα 38 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                              | 57 |
| Διάγραμμα 39 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία).....  | 58 |
| Διάγραμμα 40 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία) .....                              | 59 |
| Διάγραμμα 41 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                     | 59 |
| Διάγραμμα 42 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                                                  | 60 |
| Διάγραμμα 43 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                           | 61 |
| Διάγραμμα 44 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                           | 62 |
| Διάγραμμα 45 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                           | 62 |
| Διάγραμμα 46 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη) .....                           | 63 |
| Διάγραμμα 47 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό) .....                        | 64 |
| Διάγραμμα 48 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό).....                                                      | 64 |
| Διάγραμμα 49 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό) ..... | 65 |

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Διάγραμμα 50 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο<br>(Σταθμός Κορδελιό).....                               | 66 |
| Διάγραμμα 51 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο<br>(Σταθμός Κορδελιό).....                               | 66 |
| Διάγραμμα 52 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό).....  | 67 |
| Διάγραμμα 53 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>(Σταθμός Σίνδος).....                           | 68 |
| Διάγραμμα 54 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος) .....                                                          | 68 |
| Διάγραμμα 55 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος).....    | 69 |
| Διάγραμμα 56 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο<br>(Σταθμός Σίνδος).....                                 | 70 |
| Διάγραμμα 57 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος) .....   | 70 |
| Διάγραμμα 58 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός<br>Σίνδος).....                                 | 71 |
| Διάγραμμα 59 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>(Σταθμός Πανόραμα) .....                        | 71 |
| Διάγραμμα 60 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Πανόραμα).....                                                         | 72 |
| Διάγραμμα 61 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Πανόραμα).....  | 73 |
| Διάγραμμα 62 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο<br>(Σταθμός Πανόραμα) .....                              | 73 |
| Διάγραμμα 63 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Πανόραμα) ..... | 74 |
| Διάγραμμα 64 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός<br>Πανόραμα) .....                              | 74 |
| Διάγραμμα 65 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>(Σταθμός Καλαμαριά) .....                       | 75 |

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Διάγραμμα 66 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά).....                                                          | 75 |
| Διάγραμμα 67 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά) .....  | 76 |
| Διάγραμμα 68 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο<br>(Σταθμός Καλαμαριά) .....                               | 76 |
| Διάγραμμα 69 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά).....   | 77 |
| Διάγραμμα 70 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός<br>Καλαμαριά).....                                | 77 |
| Διάγραμμα 71 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>(Σταθμός Νεοχωρούδα).....                         | 78 |
| Διάγραμμα 72 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Νεοχωρούδα) .....                                                        | 78 |
| Διάγραμμα 73 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Νεοχωρούδα).....  | 79 |
| Διάγραμμα 74 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός<br>Νεοχωρούδα).....                               | 80 |
| Διάγραμμα 75 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Νεοχωρούδα) ..... | 81 |
| Διάγραμμα 76 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο<br>(Σταθμός Νεοχωρούδα).....                               | 81 |
| Διάγραμμα 77 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>(Σταθμός ΠΚΜ) .....                               | 82 |
| Διάγραμμα 78 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός ΠΚΜ).....                                                                | 82 |
| Διάγραμμα 79 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός ΠΚΜ) .....        | 83 |
| Διάγραμμα 80 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός<br>ΠΚΜ) .....                                     | 84 |
| Διάγραμμα 81 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων<br>PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma<br>κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός ΠΚΜ).....         | 84 |

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Διάγραμμα 82 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των<br>ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο<br>(Σταθμός ΠΚΜ) ..... | 85 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

# Διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων μετρήσεων από επίγειους σταθμούς

Α.Κορεντζέλου, Ν.Λιώρα

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα των αστικών περιοχών, με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της καταλληλότερης στατιστικής κατανομής για την περιγραφή των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στη Θεσσαλονίκη, με αξιοποίηση δεδομένων από επίγειους σταθμούς παρακολούθησης.

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τον υπολογισμό των θεωρητικών κατανομών χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα CO της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης από 5 σταθμούς μέτρησης για την χρονική περίοδο 2001-2024, καθώς και δεδομένα PM10 από 8 σταθμούς μέτρησης για την χρονική περίοδο 2017-2024. Οι κατανομές που εφαρμόστηκαν στα δεδομένα είναι οι εξής:

### Gamma Κατανομή

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad x, \alpha, \beta > 0.$$

### κανονική κατανομη

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right], \quad -\infty < x < \infty, \quad -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0.$$

Για κάθε σταθμό μέτρησης υπολογίστηκαν περιγραφικά στατικά μεγέθη, όπως μέσος όρος, τυπική απόκλιση, διασπορά, καθώς και το στατιστικό κριτήριο χ², που αποτελεί την διαφορά μεταξύ των θεωρητικών Ej και των παρατηρούμενων συχνοτήτων εμφάνισης Oj.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η κατανομή Gamma παρουσίασε καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με την κανονική κατανομή στα δεδομένα του CO και PM10 σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης.

| ΣΤΑΘΜΟΙ CO                            | Κατανομή | Συντελεστής R2 |                |                | Chi-square (x2) |                |                |
|---------------------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                       |          |                | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |                 | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)     | Gamma    | 0,93           | 0,94           | 0,94           | 2232571         | 1296341        | 337202,54      |
|                                       | Κανονική | 0,74           | 0,76           | 0,76           | 2,43E+95        | 1,3E+70        | 1,16E+71       |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ<br>(Αστικός Υποβάθρου)      | Gamma    | 0,81           | 0,81           | 0,85           | 2,65E+12        | 5,7E+31        | 11597,90       |
|                                       | Κανονική | 0,64           | 0,72           | 0,68           | 1,7E+230        | 8,6E+136       | 5,24E+27       |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ<br>(Αστικός Βιομηχανικός)    | Gamma    | 0,84           | 0,98           | 0,79           | 518063,8        | 1323840        | 57640,19       |
|                                       | Κανονική | 0,67           | 0,86           | 0,65           | 1,5E+106        | 1,46E+68       | 2,81E+70       |
| ΣΙΝΔΟΣ<br>(Περισιατικός Βιομηχανικός) | Gamma    | 0,75           | 0,96           | 0,67           | 9,32E+17        | 1,39E+40       | 4,69E+12       |
|                                       | Κανονική | 0,73           | 0,95           | 0,68           | 2,8E+290        | 3,3E+283       | 9,70E+299      |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)  | Gamma    | 0,69           | 0,92           | 0,87           | 6602,48         | 889,51         | 1580,62        |
|                                       | Κανονική | 0,54           | 0,76           | 0,58           | 7,59E+30        | 5779947        | 1,11E+20       |

Πίνακας 1 Συντελεστές R2 και x2 της κανονικής κατανομής και της gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις PM10

| ΣΤΑΘΜΟΙ PM10                           | Κατανομή | Συντελεστής R2 |                |                | Chi-square (x2) |                |                |
|----------------------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                        |          |                | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |                 | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)      | Gamma    | 0,91           | 0,95           | 0,96           | 46582,3         | 3512955        | 5350,39        |
|                                        | Κανονική | 0,75           | 0,85           | 0,77           | 2,9E+30         | 2,5E+30        | 2,96E+21       |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ<br>(Αστικός Υποβάθρου)       | Gamma    | 0,94           | 0,98           | 0,97           | 30089,5         | 622551,4       | 1902,17        |
|                                        | Κανονική | 0,82           | 0,91           | 0,79           | 2,0E+34         | 5,96E+31       | 1,3E+22        |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ<br>(Αστικός Βιομηχανικός)     | Gamma    | 0,88           | 0,90           | 0,92           | 819789          | 5,09E+12       | 83508,58       |
|                                        | Κανονική | 0,70           | 0,70           | 0,70           | 3,06E+50        | 6,87E+39       | 6,87E+39       |
| ΣΙΝΔΟΣ<br>(Περισιατικός Βιομηχανικός)  | Gamma    | 0,95           | 0,94           | 0,97           | 1,98E+12        | 4,37E+09       | 2,57E+10       |
|                                        | Κανονική | 0,81           | 0,82           | 0,80           | 8,5E+142        | 1,75E+81       | 1,14E+115      |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)   | Gamma    | 0,86           | 0,94           | 0,90           | 10610           | 9826,22        | 1807,86        |
|                                        | Κανονική | 0,68           | 0,83           | 0,64           | 3,8E+27         | 2,43E+18       | 3,42E+18       |
| ΝΕΟΧΩΡΟΥΛΑ<br>(Περισιατικός Υποβάθρου) | Gamma    | 0,94           | 0,97           | 0,89           | 2,4E+09         | 1,64E+15       | 159700,2       |
|                                        | Κανονική | 0,83           | 0,88           | 0,74           | 1,9E+96         | 1,3E+146       | 6,68E+38       |
| ΠΑΝΟΡΑΜΑ<br>(Περισιατικός Υποβάθρου)   | Gamma    | 0,96           | 0,96           | 0,94           | 1,4E+13         | 9338660        | 3,19E+10       |
|                                        | Κανονική | 0,86           | 0,88           | 0,81           | 4E+152          | 6,5E+44        | 2,1E+124       |
| ΠΚΜ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)           | Gamma    | 0,88           | 0,85           | 0,90           | 74552           | 2776765        | 11265,26       |
|                                        | Κανονική | 0,71           | 0,72           | 0,66           | 8,4E+38         | 3,73E+45       | 2,41E+29       |

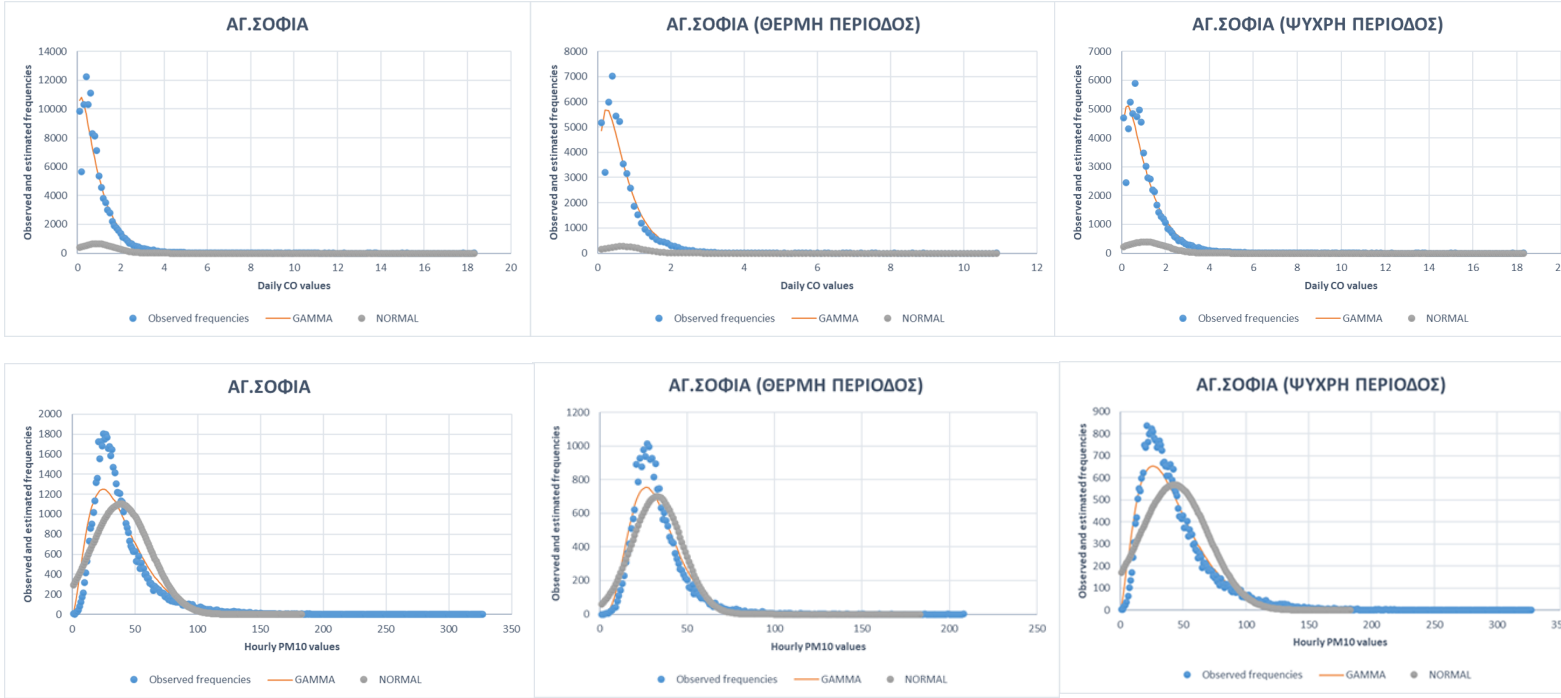
Πίνακας 2 Συντελεστές R2 και x2 της κανονικής κατανομής και της gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις PM10

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κατανομή Gamma παρουσίασε καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με την κανονική κατανομή στα δεδομένα του CO και PM10 σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης. Διαπιστώθηκε ότι η μορφή της στατιστικής κατανομής δεν αποτελεί απλώς μαθηματικό χαρακτηριστικό των δεδομένων, αλλά αντανακλά τους μηχανισμούς εκπομπής, μεταφοράς και διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων, που σχετίζονται με την εποχικότητα και τα τοπικά χαρακτηριστικά.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Wilks, D. S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences (2nd ed.). Academic Press.



Η υπεροχή της κατανομής Gamma στις ωριαίες συγκεντρώσεις τεκμηριώνεται από τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή R<sup>2</sup> και τις χαμηλότερες τιμές του συντελεστή χ², καθώς και από τα διαγράμματα των θεωρητικών και παρατηρούμενων συχνοτήτων. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι συγκεντρώσεις των δύο ρύπων εμφανίζουν έντονη θετική ασυμμετρία με παρουσία εκτεταμένης δεξιάς ουράς, η οποία αντιπροσωπεύει επεισόδια αυξημένων συγκεντρώσεων. Τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε θερμή (Μάιος-Σεπτ) και σε ψυχρή περίοδο (Οκτ-Απρ) και εξετάστηκε η επίδραση της εποχικότητας. Παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις ως προς την χρονική κατανομή τους με υψηλότερες συγκεντρώσεις και μεγαλύτερη διασπορά να καταγράφεται κατά την ψυχρή περίοδο, γεγονός που σχετίζεται με την αυξημένη χρήση καυσίμων για θέρμανση και τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που περιορίζουν τη διασπορά των ρύπων. Παράλληλα, παρατηρήθηκαν και χωρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών παρακολούθησης, οι οποίες αντανακλούν την επίδραση τοπικών πηγών εκπομπής και περιβαλλοντικών συνθηκών.

## Διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων μετρήσεων από επίγειους σταθμούς

Ασημίνα Κορεντζέλου<sup>1</sup>, Ναταλία Λιώρα<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

Email: std165383@ac.eap.gr, natalia.liora@ac.eap.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης, αξιοποιώντας ωριαία δεδομένα από το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας για την περίοδο 2001–2024 (CO) και 2017–2024 (PM10). Το μονοξείδιο του άνθρακα αποτελεί έναν πρωτογενή αδρανή ατμοσφαιρικό ρύπο που προέρχεται κυρίως από ατελείς καύσεις, με σημαντικότερη πηγή την οδική κυκλοφορία αλλά και την καύση βιομάζας. Αντίθετα, τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν έναν σύνθετο ρύπο, οι συγκεντρώσεις του οποίου επηρεάζονται τόσο από πρωτογενείς εκπομπές όσο και από δευτερογενείς διεργασίες σχηματισμού. Για κάθε σταθμό υπολογίστηκαν περιγραφικά στατιστικά (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, διασπορά), ενώ εξετάστηκε η προσαρμογή των εμπειρικών δεδομένων στην κανονική κατανομή και στην κατανομή Gamma με χρήση του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , του στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$  και γραφικών απεικονίσεων μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών κατανομών. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της εποχικότητας μέσω του διαχωρισμού των δεδομένων σε θερμή και ψυχρή περίοδο, καθώς και η χωρική μεταβλητότητα μεταξύ των σταθμών μέτρησης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι συγκεντρώσεις των δύο ρύπων εμφανίζουν σημαντική ασυμμετρία και διαφοροποιήσεις ως προς τη χωρική και χρονική κατανομή τους, ενώ η κατανομή Gamma περιγράφει αποτελεσματικότερα τις εμπειρικές κατανομές σε σχέση με την κανονική κατανομή.

**Λέξεις κλειδιά:** ατμοσφαιρική ρύπανση, στατιστική κατανομή, κανονική κατανομή, gamma κατανομή, CO, PM10, Θεσσαλονίκη

## **ABSTRACT**

The Diploma thesis focuses on investigating the statistical distribution of carbon monoxide (CO) and particulate matter (PM<sub>10</sub>) concentrations in the atmosphere of Thessaloniki, utilizing hourly data from the network of monitoring stations of the Ministry of Environment and Energy for the period 2001–2024 (CO) and 2017–2024 (PM<sub>10</sub>). Carbon monoxide is a primary inert air pollutant that originates mainly from incomplete combustion, with the most important source being road traffic and biomass combustion. In contrast, particulate matter is a complex pollutant, the concentrations of which are affected by both primary emissions and secondary formation processes. Descriptive statistics (mean, standard deviation, variance) were calculated for each station, while the fit of the empirical data to the normal distribution and the Gamma distribution was examined using the coefficient of determination  $R^2$ , the chi-square  $\chi^2$  and graphical representations between observed and theoretical distributions. In addition, the effect of seasonality was investigated by separating the data into warm and cold periods, as well as the spatial variability between the measurement stations. The results show that the concentrations of the two pollutants show significant asymmetry and differences in their spatial and temporal distribution, while the Gamma distribution generally describes the empirical distributions more effectively than the normal distribution. The aim of this work is to draw useful conclusions about the processes that determine air quality in the city of Thessaloniki and to use them to improve forecasting models and support environmental management.

**Keywords:** *air pollution, statistical distribution, normal distribution, gamma distribution, CO, PM<sub>10</sub>, Thessaloniki*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα των σύγχρονων αστικών κέντρων, επηρεάζοντας άμεσα την ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα, το κλίμα και την ποιότητα ζωής. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η κυκλοφορία οχημάτων, η βιομηχανική δραστηριότητα και η χρήση ορυκτών καυσίμων για θέρμανση αποτελούν τις κύριες πηγές εκπομπών ρύπων. Σύμφωνα με την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας (ΥΠΕΝ, 2024) αρκετές ελληνικές πόλεις παρουσιάζουν υπερβάσεις των ορίων για κρίσιμους ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια (PM10 και PM2,5), το διοξείδιο του αζώτου (NO2), το όζον (O3) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO).

Η κατανόηση της στατιστικής συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων αυτών αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και τη λήψη κατάλληλων μέτρων διαχείρισης. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην διερεύνηση της καταλληλότερης θεωρητικής στατιστικής κατανομής για την περιγραφή των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων από επίγειους σταθμούς παρακολούθησης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Μέσω της σύγκρισης των κατανομών κανονικής και Gamma επιδιώκεται και η διερεύνηση της χωρικής και εποχικής μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων των ρύπων.

Η επιλογή της Θεσσαλονίκης ως περιοχής μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για ένα από τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας, όπου η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται από την έντονη κυκλοφοριακή δραστηριότητα,

τη βιομηχανική παραγωγή, την καύση καυσίμων για θέρμανση, την υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και τις ιδιαίτερες γεωγραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τον υπολογισμό των θεωρητικών κατανομών χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα CO της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης από 5 σταθμούς μέτρησης για την χρονική περίοδο 2001-2024, καθώς και δεδομένα PM10 από 8 σταθμούς μέτρησης για την χρονική περίοδο 2017-2024. Για τη στατιστική περιγραφή των δεδομένων εφαρμόστηκαν η κανονική και η κατανομή Gamma.

### • Gamma κατανομή

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad x, \alpha, \beta > 0. \quad (1)$$

### • Κανονική Κατανομή

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

$$, -\infty < x < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0.$$

Για κάθε σταθμό παρακολούθησης υπολογίστηκαν περιγραφικά στατικά μεγέθη, όπως μέσος όρος, τυπική απόκλιση, διασπορά, καθώς και το στατιστικό κριτήριο  $\chi^2$ , που αποτελεί την διαφορά μεταξύ των θεωρητικών  $E_j$  και των παρατηρούμενων συχνοτήτων εμφάνισης  $O_j$ .

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j} \quad (3)$$

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι κατανομές αξιολογήθηκαν ως προς την ικανότητα τους να προσαρμόζονται στα δεδομένα μέσω του στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$  και του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ .

Η κατανομή Gamma παρουσίασε καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με την κανονική κατανομή στα δεδομένα του CO και PM10 σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης.

Η υπεροχή της κατανομής Gamma στις ωριαίες συγκεντρώσεις CO και PM10 τεκμηριώνεται από τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή  $R^2$  και τις χαμηλότερες τιμές του συντελεστή  $\chi^2$  σε σχέση με την κανονική κατανομή (Πίνακας 1, Πίνακας 2).

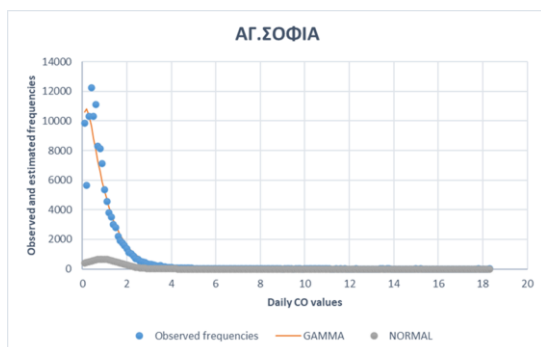
**Πίνακας 1.** Συντελεστές  $R^2$  και  $\chi^2$  της Κανονικής κατανομής και της Gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις CO

| ΣΤΑΘΜΟΙ CO                           | Κατανομή | Συντελεστής $R^2$ |                |                | Chi-square ( $\chi^2$ ) |                |                |
|--------------------------------------|----------|-------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|
|                                      |          |                   | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |                         | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)    | Gamma    | 0,93              | 0,94           | 0,94           | 2232571                 | 1296341        | 337202,54      |
|                                      | Κανονική | 0,74              | 0,76           | 0,76           | 2,43E+95                | 1,3E+70        | 1,16E+71       |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ<br>(Αστικός Υποβάθρου)     | Gamma    | 0,81              | 0,81           | 0,85           | 2,65E+12                | 5,7E+31        | 11597,90       |
|                                      | Κανονική | 0,64              | 0,72           | 0,68           | 1,7E+230                | 8,6E+136       | 5,24E+27       |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ<br>(Αστικός Βιομηχανικός)   | Gamma    | 0,84              | 0,98           | 0,79           | 518063,8                | 1323840        | 57640,19       |
|                                      | Κανονική | 0,67              | 0,86           | 0,65           | 1,5E+106                | 1,46E+68       | 2,81E+70       |
| ΣΙΝΔΟΣ<br>(Περιοδικός Βιομηχανικός)  | Gamma    | 0,75              | 0,96           | 0,67           | 9,32E+17                | 1,39E+40       | 4,69E+12       |
|                                      | Κανονική | 0,73              | 0,95           | 0,68           | 2,8E+290                | 3,3E+283       | 9,70E+299      |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας) | Gamma    | 0,69              | 0,92           | 0,87           | 6602,48                 | 889,51         | 1580,62        |
|                                      | Κανονική | 0,54              | 0,76           | 0,58           | 7,59E+30                | 5779947        | 1,11E+20       |

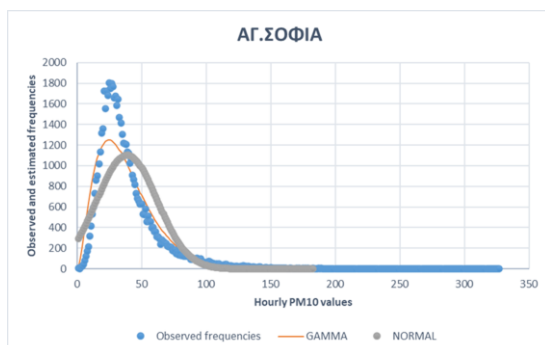
**Πίνακας 2.** Συντελεστές  $R^2$  και  $\chi^2$  της κανονικής Κατανομής και της Gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις PM10

| ΣΤΑΘΜΟΙ PM10                         | Κατανομή | Συντελεστής $R^2$ |                |                | Chi-square ( $\chi^2$ ) |                |                |
|--------------------------------------|----------|-------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|
|                                      |          |                   | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |                         | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)    | Gamma    | 0,91              | 0,95           | 0,96           | 46582,3                 | 3512955        | 5350,39        |
|                                      | Κανονική | 0,75              | 0,85           | 0,77           | 2,9E+30                 | 2,5E+30        | 2,96E+21       |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ<br>(Αστικός Υποβάθρου)     | Gamma    | 0,94              | 0,98           | 0,97           | 30089,5                 | 622551,4       | 1902,17        |
|                                      | Κανονική | 0,82              | 0,91           | 0,79           | 2,0E+34                 | 5,96E+31       | 1,3E+22        |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ<br>(Αστικός Βιομηχανικός)   | Gamma    | 0,88              | 0,90           | 0,92           | 819789                  | 5,09E+12       | 83508,58       |
|                                      | Κανονική | 0,70              | 0,70           | 0,70           | 3,06E+50                | 6,87E+39       | 6,87E+39       |
| ΣΙΝΔΟΣ<br>(Περιοδικός Βιομηχανικός)  | Gamma    | 0,95              | 0,94           | 0,97           | 1,98E+12                | 4,37E+09       | 2,57E+10       |
|                                      | Κανονική | 0,81              | 0,82           | 0,80           | 8,5E+142                | 1,75E+81       | 1,14E+115      |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας) | Gamma    | 0,86              | 0,94           | 0,90           | 10610                   | 9826,22        | 1807,86        |
|                                      | Κανονική | 0,68              | 0,83           | 0,64           | 3,8E+27                 | 2,43E+18       | 3,42E+18       |
| ΝΕΟΧΩΡΟΥΛΑ<br>(Περιοδικός Υποβάθρου) | Gamma    | 0,94              | 0,97           | 0,89           | 2,4E+09                 | 1,64E+15       | 159700,2       |
|                                      | Κανονική | 0,83              | 0,88           | 0,74           | 1,9E+96                 | 1,3E+146       | 6,68E+38       |
| ΠΑΝΟΡΑΜΑ<br>(Περιοδικός Υποβάθρου)   | Gamma    | 0,96              | 0,96           | 0,94           | 1,4E+13                 | 9338660        | 3,19E+10       |
|                                      | Κανονική | 0,86              | 0,88           | 0,81           | 4E+152                  | 6,5E+44        | 2,1E+124       |
| ΠΚΜ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)         | Gamma    | 0,88              | 0,85           | 0,90           | 74552                   | 2776765        | 11265,26       |
|                                      | Κανονική | 0,71              | 0,72           | 0,66           | 8,4E+38                 | 3,73E+45       | 2,41E+29       |

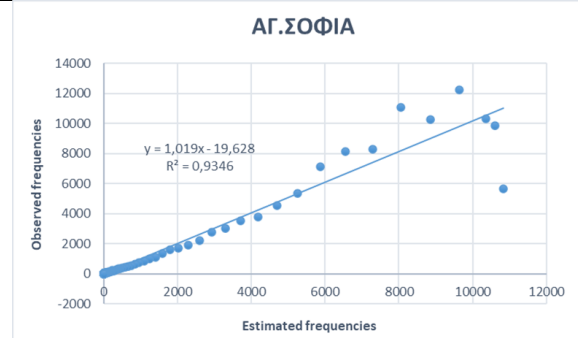
Παράλληλα, εξετάστηκαν και οι γραφικές απεικονίσεις μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών κατανομών για κάθε σταθμό. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι συγκεντρώσεις των δύο ρύπων CO και PM10 εμφανίζουν έντονη θετική ασυμμετρία με παρουσία εκτεταμένης δεξιάς ουράς, η οποία αντιπροσωπεύει επεισόδια αυξημένων συγκεντρώσεων (Διάγραμμα 1, 2). Η μορφή αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό των ατμοσφαιρικών ρύπων και αντανακλά στη φύση των πηγών εκπομπής και των μετεωρολογικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά των αιωρούμενων σωματιδίων. Η κανονική κατανομή, λόγω της συμμετρικής της φύσης, δεν μπορεί να αποδώσει επαρκώς αυτή τη συμπεριφορά, υποεκτιμώντας τις υψηλές συγκεντρώσεις και αποκλίνοντας από τη μορφή των διαγραμμάτων.



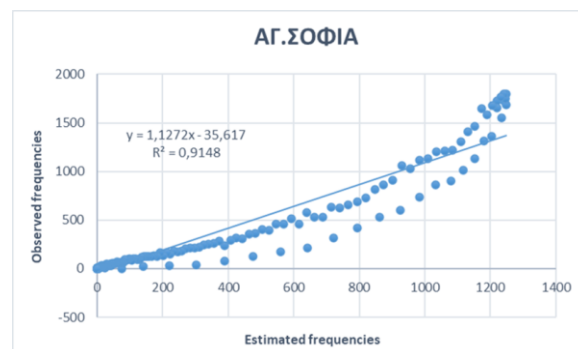
Διάγραμμα 1 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)



Διάγραμμα 2 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)



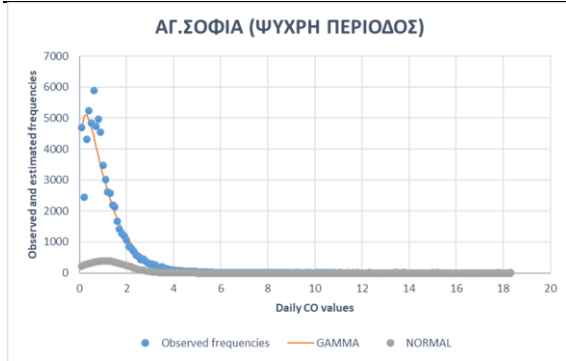
Διάγραμμα 3 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)



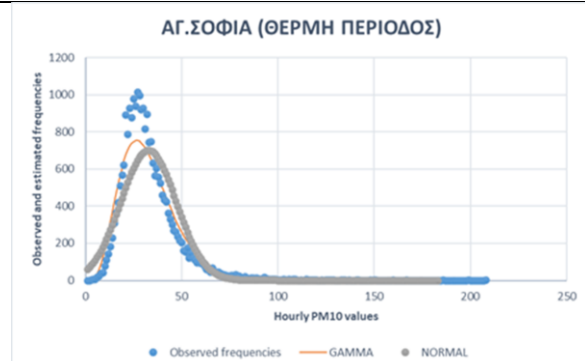
Διάγραμμα 4 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση της εποχικότητας μέσω του διαχωρισμού των δεδομένων σε θερμή περίοδο (Μάιος-Σεπτ) και σε ψυχρή περίοδο (Οκτ-Απρ), ώστε να διερευνηθεί ο ρόλος των διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών και των πηγών εκπομπής στη μορφή των στατιστικών κατανομών. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 5,6,7,8 οι συγκεντρώσεις των ρύπων διαφοροποιούνται ως προς την χρονική κατανομή τους. Υψηλότερες συγκεντρώσεις και μεγαλύτερη διασπορά καταγράφεται κατά την ψυχρή περίοδο, γεγονός που σχετίζεται με την αυξημένη χρήση καυσίμων και καύση βιομάζας για θέρμανση και τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που περιορίζουν τη διασπορά των ρύπων.

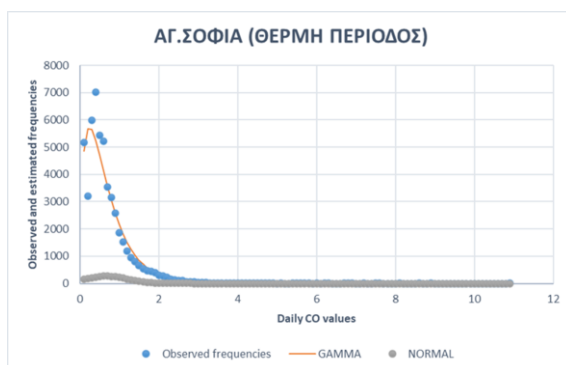
Κορεντζέλου Ασημίνα, Διερεύνηση της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων μετρήσεων από επίγειους σταθμούς



Διάγραμμα 5 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)



Διάγραμμα 8 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)



Διάγραμμα 6 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)



Διάγραμμα 7 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων παρουσιάζουν χρονική μεταβλητότητα και έντονη χωρική μεταβλητότητα, καθώς επηρεάζονται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, η τοπογραφία της περιοχής και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των αστικών περιοχών.

Ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα, οι δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες και η περιορισμένη κυκλοφορία των αέριων μαζών μπορούν να δυσχεράνουν τον αερισμό και τη διάχυση των συσσωρευμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα, οδηγώντας στην εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεων. Ως αποτέλεσμα, οι χρονοσειρές των συγκεντρώσεων χαρακτηρίζονται συχνά από σημαντική μεταβλητότητα, ασυμμετρία και ακραίες τιμές.

Η ανάλυση ανέδειξε ότι η στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος μέτρησης. Οι σταθμοί υποβάθρου παρουσίασαν γενικά μικρότερη μεταβλητότητα και καλύτερη προσαρμογή των θεωρητικών κατανομών, ενώ στους σταθμούς κυκλοφορίας και στους σταθμούς βιομηχανίας παρατηρήθηκαν μεγαλύτερη διασπορά και συχνότερα επεισόδια αυξημένων συγκεντρώσεων.

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο ρύπων κατέδειξε ότι, παρά το γεγονός ότι η κατανομή Gamma αποτελεί το καταλληλότερο στατιστικό μοντέλο και στις δύο περιπτώσεις, η φυσική ερμηνεία της ασυμμετρίας των συγκεντρώσεων διαφέρει ουσιαστικά. Το CO αποτελεί κυρίως πρωτογενή και σχεδόν αδρανή ρύπο, με τις συγκεντρώσεις του να καθορίζονται κυρίως από τις εκπομπές και τις συνθήκες διασποράς. Αντίθετα, τα PM<sub>10</sub> αποτελούν σύνθετο μίγμα πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων, του οποίου η συμπεριφορά επηρεάζεται από πλήθος φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών, όπως η κυκλοφορία, η βιομηχανία, η οικιακή θέρμανση, η επαναιώρηση σκόνης, η περιφερειακή μεταφορά και ο δευτερογενής σχηματισμός σωματιδίων. Η πολυπλοκότητα αυτή εξηγεί την εμφανώς καλύτερη εφαρμογή των δεδομένων του CO σε σύγκριση με τα PM<sub>10</sub>, όπου παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και εμπειρικής κατανομής.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα της κατανομής Gamma για την περιγραφή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και PM<sub>10</sub> στη Θεσσαλονίκη και συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση της στατιστικής συμπεριφοράς των ατμοσφαιρικών ρύπων σε διαφορετικά μικροκλίματα μέτρησης.

Η καλύτερη προσαρμογή της κατανομής Gamma τόσο στις συγκεντρώσεις του CO όσο και στις συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> οφείλεται στην ασύμμετρη φύση των δεδομένων, όμως η προέλευση αυτής της ασυμμετρίας διαφέρει ουσιαστικά μεταξύ των δύο ρύπων. Στην περίπτωση του CO η ασυμμετρία αποδίδεται κυρίως στη μεταβλητότητα των τοπικών εκπομπών και των συνθηκών διασποράς, ενώ στα PM<sub>10</sub> αποτελεί αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης

πολλαπλών μηχανισμών εκπομπής, δευτερογενούς σχηματισμού και μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων. Η διαπίστωση αυτή αναδεικνύει ότι η στατιστική ανάλυση μπορεί να αποτελέσει όχι μόνο εργαλείο περιγραφής των συγκεντρώσεων, αλλά και μέσο ερμηνείας των διεργασιών που διαμορφώνουν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας υποδηλώνουν ότι η μορφή της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων δεν αποτελεί αποκλειστικά μαθηματικό χαρακτηριστικό των δεδομένων, αλλά αντανακλά τους φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς που καθορίζουν την παραγωγή, τη μεταφορά, τον μετασχηματισμό και την απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aydın, D. (2024). A comparison of the statistical distributions of air pollution concentrations in Sinop, Turkey. *Environment Protection Engineering*, 50(4).  
<https://doi.org/10.37190/epe240403>
- Chatzopoulou A. & Mavroidis I., (2025). Spatiotemporal Analysis of Air Pollutants in Thessaloniki, Greece, *Atmosphere* 2025, 16, 1057.  
<https://doi.org/10.3390/atmos16091057>
- Chatoutsidou, S. E., et al. (2025). PM10 Mass Concentration Characteristics in a Coastal Mediterranean Site. *Air Quality, Atmosphere & Health*.
- European Environment Agency. (2024). Air quality in Europe 2024 report.
- Ghazali, N. A., et al. (2014). Modeling ozone concentration using statistical distributions
- Giavis, G. M., Kambezidis, H. D., & Lykoudis, S. P. (2009). Frequency distribution of particulate matter (PM10) in urban environments. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1–3), 99–109.  
<https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021819>
- Gavriil, I., Grivas, G., Kassomenos, P., Chaloulakou, A., & Spyrellis, N. (2006). An application of theoretical probability distributions to the study of PM10 and PM2.5 time series in Athens, Greece. *Global NEST Journal*, 8(3), 241–251.  
<https://doi.org/10.30955/gnj.000401>
- Gokhale, S., & Khare, M. (2007). Statistical behavior of carbon monoxide from vehicular exhausts in urban environments. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 526–535.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.008>
- Zoumakis, N. M., Kelessis, A. G., Petrakakis, M., Nikolaou, K., & Kozyraki, T. I. (1994). A microscale dispersion model for carbon monoxide emitted from motor vehicles. *The Science of the Total Environment*, 146–147, 401–407.  
[https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90262-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90262-3)
- Jaffar, N., et al. (2018). Statistical distributions of air pollutants in Malaysia
- Jaffar, M. I., Hamid, H. A., Yunus, R., & Raffee, A. F. (2018). Fitting statistical distribution on air pollution: An overview. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.23), 40–44.  
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.23.17088>
- Krishnamoorthy, K. (2006). Handbook of statistical distributions with applications. Chapman & Hall/CRC.
- Kassomenos, P., Lykoudis, S., & Chaloulakou, A. (2010). A tool for determining urban emission characteristics to be used in exposure assessment. *Environment International*, 36(5), 454–460.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.011>
- Kalabokas, P. D., Adamopoulos, A. D., & Viras, L. G. (2010). Atmospheric PM10 particle concentration measurements at central and peripheral urban sites in Athens and Thessaloniki, Greece. *Global NEST Journal*, 12(1), 71–83.  
<https://doi.org/10.30955/gnj.000691>
- Liora, N.; Kontos, S.; Tsiaousidis, D.; Salanova Grau, J.M.; Siomos, A.; Melas, D. Spatiotemporal Variability of Road Transport Emissions Based on Vehicle Speed Profiles—Impacts on Urban Air Quality: A Case Study for Thessaloniki, Greece. *Atmosphere* 2025, 16, 1337.  
<https://doi.org/10.3390/atmos16121337>
- Lu, H.-C. (2002). Study on statistical distributions of air pollutants in Taiwan
- Lu, H.-C. (2004). Urban air pollution distribution analysis in Taiwan
- Maciejewska, K., et al. (2015). Distribution analysis of air pollutants in Warsaw
- Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Korea & National Council on Climate and Air Quality of the Republic of Korea. (2021). Air pollution: An introduction to its causes, effects, and solutions.
- Wilks, D. S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences (2nd ed.). Academic Press
- Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της ατμόσφαιρας 2024  
<https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/>

## Σημαντικότερα σημεία της εργασίας (Highlights)

- Η κατανομή Gamma προσαρμόστηκε καλύτερα τις συγκεντρώσεις CO και PM10 σε σχέση με την κανονική κατανομή, αποδίδοντας μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) και χαμηλότερες τιμές του στατιστικού ελέγχου ( $\chi^2$ ).
- Οι συγκεντρώσεις των ρύπων παρουσιάζουν έντονη θετική ασυμμετρία και η κανονική κατανομή δεν μπορεί να τις περιγράψει ικανοποιητικά λόγω της συμμετρικής της φύσης.
- Η στατιστική συμπεριφορά των δεδομένων επηρεάζεται από τη χωρική και εποχική μεταβλητότητα των ρύπων.
- Τα αιωρούμενα σωματίδια PM10 παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα από το CO και πιο σύνθετη στατιστική συμπεριφορά, λόγω της επίδρασης πρωτογενών και δευτερογενών διεργασιών καθώς και της μεταφοράς σωματιδίων.
- Η μορφή της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων αντανακλά τους μηχανισμούς εκπομπής, μεταφοράς και διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων.
- Τα αποτελέσματα της εργασίας συμβάλλουν στη στατιστική μοντελοποίηση, στην εκτίμηση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στην αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα.

## Συνεισφορά της εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στη στατιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων (CO και PM10) σε ένα μεγάλο αστικό κέντρο της Ελλάδας, την Θεσσαλονίκη, αξιοποιώντας εκτεταμένα ωριαία δεδομένα παρακολούθησης του ΥΠΕΝ. Η σύγκριση αξιολόγηση διαφορετικών θεωρητικών στατιστικών κατανομών (Gamma και κανονική κατανομή) και η διερεύνηση της χωρικής και εποχικής μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που διαμορφώνουν την ποιότητα του αέρα. Παράλληλα, τα αποτελέσματα μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τη βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και να υποστηρίξουν τη λήψη αποτελεσματικότερων μέτρων περιβαλλοντικής διαχείρισης και προστασίας της δημόσιας υγείας.

## Εισαγωγή

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα των σύγχρονων αστικών κέντρων, επηρεάζοντας άμεσα την ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα, το κλίμα και την ποιότητα ζωής. Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων σχετίζονται κυρίως με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η κυκλοφορία οχημάτων, η βιομηχανική δραστηριότητα και η χρήση ορυκτών καυσίμων για θέρμανση. Σύμφωνα με την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας (ΥΠΕΝ, 2024) αρκετές ελληνικές πόλεις παρουσιάζουν υπερβάσεις των ορίων για κρίσιμους ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια ( $PM_{10}$  και  $PM_{2,5}$ ), το διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ), το όζον ( $O_3$ ) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, το μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ).

Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων παρουσιάζουν έντονη χωρική και εποχική μεταβλητότητα, καθώς επηρεάζονται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, η τοπογραφία της περιοχής και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των αστικών περιοχών. τα οποία περιορίζουν τον αερισμό και τη διάχυση των συσσωρευμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα, οι δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες και η περιορισμένη κυκλοφορία των αέριων μαζών μπορούν να δυσχεράνουν τον αερισμό και τη διάχυση των ρύπων, οδηγώντας στην εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεων. Ως αποτέλεσμα, οι χρονοσειρές των συγκεντρώσεων χαρακτηρίζονται συχνά από σημαντική μεταβλητότητα, ασυμμετρία και ακραίες τιμές, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη διερεύνηση της στατιστικής τους συμπεριφοράς.

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της καταλληλότερης στατιστικής κατανομής για την περιγραφή των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα ( $CO$ ) και των αιωρούμενων σωματιδίων ( $PM_{10}$ ) στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης με χρήση δεδομένων από επίγειους σταθμούς παρακολούθησης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Για τη στατιστική περιγραφή των δεδομένων εφαρμόζονται η κανονική και η κατανομή Gamma, οι οποίες αξιολογούνται ως προς την ικανότητά τους να προσαρμόζονται στα εμπειρικά δεδομένα μέσω του στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$ , του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) και γραφικών συγκρίσεων μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών κατανομών. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση της εποχικότητας μέσω του διαχωρισμού των δεδομένων σε θερμή και ψυχρή περίοδο, ώστε να διερευνηθεί ο ρόλος των διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών και των πηγών εκπομπής στη μορφή των στατιστικών κατανομών. Η εργασία επιδιώκει να αναδείξει ότι η μορφή της στατιστικής κατανομής δεν αποτελεί απλώς μαθηματικό χαρακτηριστικό των δεδομένων, αλλά αντανακλά τους μηχανισμούς εκπομπής, μεταφοράς και διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Η επιλογή της Θεσσαλονίκης ως περιοχής μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για ένα από τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας, όπου η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται από την έντονη κυκλοφοριακή δραστηριότητα, τη βιομηχανική παραγωγή, την υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και τις ιδιαίτερες γεωγραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι, οι πηγές εκπομπής τους και οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Επιπλέον, παρουσιάζεται συνοπτική επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, με έμφαση σε μελέτες που αξιοποιούν στατιστικές κατανομές για την περιγραφή αντίστοιχων δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας και περιγράφονται οι στατιστικές κατανομές (κανονική και γάμμα) που εφαρμόζονται για τη διερεύνηση των κατανομών των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα κριτήρια αξιολόγησης της προσαρμογής των θεωρητικών κατανομών στα εμπειρικά δεδομένα.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η ποιότητα της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης και των γεωγραφικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων CO και PM10 με αξιοποίηση ωριαίων μετρήσεων από το δίκτυο του ΥΠΕΝ. Για κάθε σταθμό και έτος υπολογίζονται βασικά περιγραφικά στατιστικά μεγέθη (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και διασπορά), ενώ αξιολογείται η προσαρμογή των δεδομένων στην κανονική και την κατανομή Gamma. Επιπλέον, διερευνάται η χωρική, χρονική και εποχική μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας, αναδεικνύονται τα σημαντικότερα ευρήματα της έρευνας και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των σύγχρονων αστικών πόλεων. Ο όρος ατμοσφαιρική ρύπανση αναφέρεται στην παρουσία ουσιών στην ατμόσφαιρα σε συγκέντρωση ή σε χρονικά διαστήματα που υπερβαίνουν τα φυσιολογικά επίπεδα, επηρεάζοντας αρνητικά την υγεία των ανθρώπων, τα οικοσυστήματα και το περιβάλλον στο σύνολο του (ΥΠΕΝ, 2025).

Κύρια πηγή παραγωγής ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι οι βιομηχανικές δραστηριότητες και οι ανθρώπινες δραστηριότητες που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας για θέρμανση και μεταφορές. Η συγκέντρωση ρύπων στην ατμόσφαιρα ευθύνεται για την εμφάνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας 2024 στην Ελλάδα σε αρκετές πόλεις παρατηρείται υπέρβαση των συγκεντρώσεων των ρύπων που επηρεάζει την υγεία και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων καθώς και το φυσικό δομημένο περιβάλλον.

### 1.2 Πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Διάφορες είναι οι πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ταξινομούνται ανάλογα με την προέλευση σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: φυσικές πηγές, κινητές πηγές, σταθερές πηγές και πηγές της περιοχής (NCCA, 2021).

Οι φυσικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες αλλά με φυσικές διεργασίες. Στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται η σκόνη, τα θαλάσσια σταγονίδια, οι δασικές πυρκαγιές, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι κεραυνοί, οι μικροβιακές διεργασίες στο έδαφος και οι εκπομπές από τη βλάστηση. Οι φυσικές αυτές πηγές εκπέμπουν ρύπους όπως αιωρούμενα σωματίδια (PM), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>) και μεθάνιο (CH<sub>4</sub>).

Οι κινητές πηγές αφορούν μέσα που μετακινούνται και εκπέμπουν ρύπους κατά τη λειτουργία τους, όπως τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά, τα λεωφορεία, οι μοτοσικλέτες, τα αεροπλάνα, τα πλοία, τα τρένα και διάφορα μηχανήματα. Οι κινητές πηγές αποτελούν βασική αιτία εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του αζώτου, αιωρούμενων σωματιδίων και πτητικών οργανικών ενώσεων, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές όπου η κυκλοφορία οχημάτων είναι αυξημένη.

Οι σταθερές πηγές αφορούν εκπομπές ρύπων από σταθερές εγκαταστάσεις όπως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διυλιστήρια και βιομηχανίες. Οι σταθερές πηγές ευθύνονται κυρίως για εκπομπές διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, διοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων.

Τέλος, οι πηγές της περιοχής αφορούν εκπομπές από την οικιακή θέρμανση, το μαγείρεμα, τη γεωργία, τη χρήση λιπασμάτων και ζωικών αποβλήτων, καθώς και καθημερινές δραστηριότητες όπως η χρήση διαλυτών, καθαριστικών και βαφών. Οι πηγές περιοχής είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις εκπομπές αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ), πτητικών οργανικών ενώσεων και αιωρούμενων σωματιδίων.

### 1.3 Ατμοσφαιρικοί ρύποι

Οι βασικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι το οξείδιο του θείου ( $\text{SOX}$ ), τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NOX}$ ), το όζον ( $\text{O}_3$ ), τα αιωρούμενα σωματίδια ( $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$ ) και το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) (Ρεμουντάκη, 2010). Οι ρύποι της ατμόσφαιρας ταξινομούνται ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού και τη χημική τους μορφή.

Με βάση τον τρόπο σχηματισμού τους διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύπους. Πρωτογενείς ρύποι ονομάζονται οι ρύποι που σχετίζονται με άμεση εκπομπή στην ατμόσφαιρα από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές. Οι κυριότεροι πρωτογενείς ρύποι είναι το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), τα αιωρούμενα σωματίδια ( $\text{PM}$ ), πτητικές οργανικές ενώσεις ( $\text{VOC}$ ), κλπ. Η παρουσία των πρωτογενών ρύπων στην ατμόσφαιρα με τη συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί φωτοχημικές αντιδράσεις και οι πρωτογενείς ρύποι μετατρέπονται σε δευτερογενείς. Οι κυριότεροι δευτερογενείς ρύποι είναι όζον ( $\text{O}_3$ ), δευτερογενή οργανικά αερολύματα και θειικά και νιτρικά σωματίδια (Ρεμουντάκη, 2010). Ρύποι όπως τα αιωρούμενα σωματίδια  $\text{PM}$  και το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) είναι πρωτογενείς και δευτερογενείς.

Με βάση την φυσική τους μορφή οι ρύποι διακρίνονται σε αέριους και σωματιδιακούς ρύπους. Στους αέριους ρύπους περιλαμβάνονται το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), το όζον ( $\text{O}_3$ ) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις ( $\text{VOCs}$ ). Στους σωματιδιακούς ρύπους περιλαμβάνονται στερεά και υγρά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα όπως αιωρούμενα σωματίδια ( $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$ ), ο μαύρος άνθρακας ( $\text{BC}$ ) και ο οργανικός άνθρακας ( $\text{OC}$ ).

### 1.4 Περιγραφή των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων

#### 1.4.1 Οξείδια του θείου

Τα οξείδια του θείου  $\text{SO}_x$  είναι ομάδα ενώσεων θείου και οξυγόνου που είναι διαλυτά άχρωμα αέρια με έντονη οσμή και γεύση. Αποτελούν πρωτογενείς ρύπους, οι οποίοι αντιδρούν με άλλες ενώσεις και σχηματίζονται θειικά σωματίδια, που περιέχονται στα αιωρούμενα σωματίδια  $\text{PM}$  και συμμετέχουν στον σχηματισμό της όξινης βροχής (ΥΠΕΝ, 2025). Η πιο συχνή μορφή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι το διοξείδιο του  $\text{SO}_2$  (NCCA, 2021).

Το διοξείδιο του θείου προέρχεται κυρίως από καύση θείου ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας) από βιομηχανικές διεργασίες σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας και διυλιστήρια (ΥΠΕΝ,2025). Άλλες μικρότερες πηγές SO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν τον τομέα των μεταφορών (π.χ. πλοία, αυτοκίνητα, φορτηγά) (NCCA, 2021). Η μέση οριακή συγκέντρωση διοξειδίου του θείου είναι 350μg/m<sup>3</sup> (ΥΠΕΝ,2025).

Τα θειικά αερολύματα είναι βλαβερά για την υγεία, καθώς προκαλούν αναπνευστικό ερεθισμό και ερεθισμό στα μάτια. Αρκετά πιο επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία είναι τα θειικά ιόντα που περιέχονται στα αιωρούμενα σωματίδια των PM<sub>2.5</sub>, λόγω της διείσδυσης λεπτών σωματιδίων στην κυκλοφορία του αίματος. (NCCA, 2021).

#### 1.4.2 Οξείδια του αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) αποτελούν μια ομάδα τοξικών ενώσεων που περιέχουν άζωτο και οξυγόνο. Τα κύρια οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub> είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Το NO είναι άχρωμο ενώ το NO<sub>2</sub> έχει κόκκινο ή καφέ χρώμα και έντονη οσμή.

Τα οξείδια του αζώτου αποτελούν πρωτογενείς ρύπους στην ατμόσφαιρα που αλληλοεπιδρούν μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων με άλλους ρύπους συμβάλλοντας στο σχηματισμό της όξινης βροχής και του φωτοχημικού νέφους. Το NO στην ατμόσφαιρα αντιδρά με το όζον O<sub>3</sub> δημιουργώντας NO<sub>2</sub>. Το NO<sub>2</sub> διασπάται με την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας από τον σχηματισμό όζοντος O<sub>3</sub> και παράγεται NO και άτομο οξυγόνου (O). Τα άτομο οξυγόνου (O) αντιδρά με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο (O<sub>2</sub>) και παράγεται όζον O<sub>3</sub>. Παράλληλα, τα οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub> απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω της αντίδρασης της ρίζας υδροξυλίου (OH) με NO<sub>2</sub> με σχηματισμό νιτρικού οξέος (HNO<sub>3</sub>) (NCCA, 2021).

Τα οξείδια του αζώτου εκπέμπονται κυρίως από την καύση καυσίμων, με τις οδικές μεταφορές να αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή NO<sub>x</sub>. Η έκθεση στο NO<sub>2</sub> προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα όπως βρογχίτιδα και κρίση άσθματος (Ρεμουντάκη, 2010).

#### 1.4.3 Όζον

Το όζον O<sub>3</sub> αποτελεί ένα δευτερογενή ατμοσφαιρικό ρύπο που εντοπίζεται στην στρατόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα. Το όζον της στρατόσφαιρας είναι ιδιαίτερο χρήσιμο καθώς απορροφά την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Αντιθέτως το όζον της τροπόσφαιρας είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο καθώς οξειδώνεται με άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους και έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και στο οικοσύστημα (NCCA, 2021). Η έκθεση σε όζον μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό των ματιών και αναπνευστικά προβλήματα όπως βήχα και άσθμα (Ρεμουντάκη, 2010).

Το όζον σχηματίζεται από φωτοχημικές αντιδράσεις παρουσίας ηλίου με ρύπους όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου, πτητικές ενώσεις VOCs κτλ. Το χρώμα του ποικίλλει από διαφανές έως ανοιχτό μπλε. Κατά τις θερμές περιόδους παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις καθώς το ηλιακό φως είναι πιο έντονο. (Ρεμουντάκη, 2010).

#### 1.4.4 Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα στερεών και υγρών σωματιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και συνιστούν έναν από τους σημαντικότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους λόγω των επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους, διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια.

Τα πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από φυσικές πηγές, όπως η σκόνη, οι δασικές πυρκαγιές, το θαλάσσιο αερόλυμα και οι ηφαιστειακές εκρήξεις, αλλά και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, οι βιομηχανικές διεργασίες και οι μεταφορές. Η σύστασή τους περιλαμβάνει οργανικές και ανόργανες ενώσεις, ορυκτή σκόνη, άνθρακα, μέταλλα και άλλα ιχνοστοιχεία (WHO, 2021).

Τα δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια δεν εκπέμπονται άμεσα, αλλά σχηματίζονται από μια σειρά πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων που οδηγούν στον σχηματισμό θεικών (SO<sub>x</sub>) και νιτρικών ιόντων (NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>) και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) (NCCA, 2021). Ο σχηματισμός των δευτερογενών αιωρούμενων σωματιδίων προέρχεται από εκπομπές κυρίως από τη βιομηχανία, τις μεταφορές, την οικιακή θέρμανση και τις γεωργικές δραστηριότητες.

Τα σωματίδια ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται σε PM10 (διάμετρος ≤ 10) και PM2.5 (διάμετρος ≤ 2,5). Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σωματιδίων, τόσο βαθύτερα μπορούν να διεισδύσουν στο αναπνευστικό σύστημα και να θεωρηθούν ιδιαίτερα επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Τα λεπτά σωματίδια PM2.5, λόγω του μικρού μεγέθους τους, μπορούν να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα, να επηρεάσουν την κυκλοφορία του αίματος και να προκαλέσουν καρδιακές παθήσεις, πνευμονοπάθειες και θάνατο. Σε αντίθεση τα PM10, λόγω του σχετικά μεγαλύτερου μεγέθους τους, δεν διεισδύουν τόσο βαθιά στους πνεύμονες όσο τα λεπτότερα σωματίδια PM2.5 και εναποτίθενται κυρίως στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, όπως στη ρινική κοιλότητα, τον φάρυγγα, την τραχεία και τους βρόγχους. Η παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις PM10 έχει συσχετιστεί με σημαντικές δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (WHO, 2021).

Η χημική σύσταση των PM ποικίλλει ανάλογα με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, τη γεωγραφική θέση (αστική ή αγροτική περιοχή), τις κυρίαρχες πηγές εκπομπών και την εποχή του έτους (NCCA, 2021). Κατά μέσο όρο, τα PM αποτελούνται από δευτερογενή ανόργανα αερολύματα (θειικά, νιτρικά και άλατα αμμωνίου), οργανική ύλη και πρωτογενή συστατικά (μαύρο άνθρακα, ορυκτή σκόνη, θαλάσσιο αλάτι, ίχνη μετάλλων).

Σύμφωνα με τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO, 2021), η ετήσια μέση συγκέντρωση των PM10 δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 15 μg/m<sup>3</sup>, ενώ η μέση ημερήσια συγκέντρωση δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 45 μg/m<sup>3</sup>, καθώς η υπέρβαση των

τιμών αυτών σχετίζεται με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία.

Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Στις αστικές περιοχές επηρεάζονται κυρίως από την κυκλοφορία των οχημάτων, τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τη θέρμανση των κατοικιών, ενώ στις αγροτικές περιοχές σημαντική συμβολή έχουν οι γεωργικές δραστηριότητες μέσω των εκπομπών αμμωνίας (Grivas et al., 2024). Εποχικά, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται συνήθως κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω της αυξημένης καύσης καυσίμων και βιομάζας για θέρμανση, καθώς και εξαιτίας των συνθηκών θερμοκρασιακής αναστροφής που περιορίζουν τη διασπορά των ρύπων. Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες, επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης και η ενισχυμένη φωτοχημική δραστηριότητα μπορούν επίσης να προκαλέσουν σημαντικές αυξήσεις στις συγκεντρώσεις των PM, ιδιαίτερα στις χώρες της Μεσογείου, όπως η Ελλάδα (Chatoutsidou et al., 2025).

#### 1.4.5 Μονοξείδιο του άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα CO αποτελεί ένα δηλητηριώδες, άχρωμο, άοσμο, άγευστο και εύφλεκτο αέριο που παράγεται από την ατελή καύση ανθρακούχων ενώσεων, όταν η διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου δεν επαρκεί για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Στην ατμόσφαιρα, το CO διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη χημική ισορροπία, καθώς αντιδρά με τις ρίζες υδροξυλίου (OH), επηρεάζοντας άμεσα την οξειδωτική ικανότητα της τροπόσφαιρας και, έμμεσα, τη συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου όπως το μεθάνιο, η φορμαλδεΰδη, το όζον και το διοξείδιο του άνθρακα. Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του είναι η αντίδρασή του με τις ρίζες υδροξυλίου OH (Seinfeld & Pandis, 2016).

Το μονοξείδιο του άνθρακα θεωρείται αρκετά επικίνδυνος ρύπος για την ανθρώπινη υγεία, καθώς μειώνει την ποσότητα οξυγόνου στο αίμα. Η έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις CO επιφέρει επιβλαβείς επιπτώσεις στους ανθρώπους, ιδιαίτερα σε άτομα με υποκείμενες επιπλοκές υγείας και προκαλεί ζάλη, πόνο στο στήθος και θολή όραση. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις CO μπορεί να προκαλέσει απώλεια αισθήσεων και σε ακραίες περιπτώσεις θάνατο (Zoumakis & Kelessis 1994).

Η ετήσια έκθεση ποιότητας της ατμόσφαιρας (YPIEN, 2025) αναφέρει ότι στην Ελλάδα και ειδικότερα στα μεγάλα αστικά κέντρα, όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, τα επίπεδα CO παραμένουν γενικά εντός των ορίων της ευρωπαϊκής νομοθεσίας. Η Οδηγία 2008/50/EK καθορίζει ως οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας τα 10 mg/m<sup>3</sup>, υπολογιζόμενα ως μέγιστος ημερήσιος οκτάωρος μέσος όρος.

Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα CO προέρχονται κυρίως από ανθρωπογενείς πηγές και εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε αστικές περιοχές. Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι εκπομπές από ατελή καύση βιομάζας και ορυκτών καυσίμων για θέρμανση και οδική μεταφορά και οι βιομηχανικές δραστηριότητες. Εκτός των ανθρωπογενών πηγών υπάρχουν και φυσικές πηγές όπως οι πυρκαγιές δασών και η

χημική οξείδωση του μεθανίου και άλλων υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα (Mermigkas et al., 2025). Ειδικότερα, οι μεγάλες δασικές πυρκαγιές που εκδηλώνονται κατά τους θερινούς μήνες μπορούν να προκαλέσουν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις CO, επηρεάζοντας την ποιότητα του αέρα ακόμη και σε περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την εστία της πυρκαγιάς (Panou et al., 2023).

Σύμφωνα με τους Zoumakis et al. (1994) η οδική μεταφορά αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή εκπομπών CO, λόγω της ατελούς καύσης καυσίμου στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, η οποία οφείλεται κυρίως σε ανεπαρκή παροχή οξυγόνου ή χαμηλές θερμοκρασίες καύσης. Οι υψηλότερες τιμές CO παρατηρούνται σε συνθήκες συμφόρησης ή χαμηλών ταχυτήτων ενώ παράγοντες που καθορίζουν τα επίπεδα συγκέντρωσης του ρύπου είναι η ηλικία των οχημάτων, η τεχνολογία των κινητήρων και η ποιότητα των καυσίμων. Η Ελλάδα παρουσιάζει από τις υψηλότερες τιμές μονοξειδίου του άνθρακα λόγω του γερασμένου στόλου οχημάτων και της εκτεταμένης χρήσης πετρελαιοκίνητων οχημάτων.

Η αστική μορφολογία των πόλεων αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τις συγκεντρώσεις του CO. Τα αστικά φαράγγια των σύγχρονων πόλεων, δηλαδή τα ψηλά κτίρια με τους στενούς δρόμους, περιορίζουν τη διάχυση των ρύπων και ενισχύουν τη συσσώρευσή τους στους οδικούς άξονες (Zoumakis et al., 1994).

Σύμφωνα με την μελέτη των Mermigkas et al. (2025) οι συγκεντρώσεις του CO παρουσιάζουν επίσης έντονη εποχική διακύμανση. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται κατά τους χειμερινούς μήνες, εξαιτίας της αυξημένης χρήσης καυσίμων και βιομάζας για θέρμανση, αλλά και της μειωμένης διαθεσιμότητας των ριζών OH, που αποτελούν τον κύριο μηχανισμό απομάκρυνσης του ρύπου από την ατμόσφαιρα. Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες, η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία ενισχύει τη φωτοχημική παραγωγή των ριζών OH, επιταχύνοντας την οξείδωση του CO και οδηγώντας σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις (Mermigkas et al., 2025).

Τέλος, οι συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα επηρεάζονται από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Οι θερμοκρασιακές αναστροφές, οι χαμηλές ταχύτητες και η υψηλή σχετική υγρασία συνδέονται με παγίδευση ρύπων σε χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (Chatzopoulou & Mavroidis, 2025). Αντίθετα, η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία και καλή ανάμιξη της ατμόσφαιρας λόγω αύξησης της ταχύτητας του ανέμου οδηγούν στη μείωση των συγκεντρώσεων CO, λόγω καλύτερης διάχυσης και ταχύτερων φωτοχημικών διεργασιών.

## 1.5 Σημασία της στατιστικής ανάλυσης των ατμοσφαιρικών ρύπων

Η ατμοσφαιρική ρύπανση συνιστά σημαντικό πρόβλημά των σύγχρονων κοινωνιών με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στην ποιότητα ζωής, στα οικοσυστήματα και στο κλίμα. Η συνεχής αστικοποίηση, η αύξηση του αριθμού των οχημάτων, η βιομηχανική δραστηριότητα και η κατανάλωση ενέργειας ευθύνονται για τις αυξημένες εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, καθιστώντας απαραίτητη τη συστηματική παρακολούθηση και αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα.

Μεταξύ των ατμοσφαιρικών ρύπων που συνδέονται άμεσα με δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM10). Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται κυρίως από την ατελή καύση καυσίμων (βιομάζα), με βασική πηγή τις μεταφορές και ιδιαίτερα τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αντίστοιχα, τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται τόσο από πρωτογενείς πηγές, όπως η κυκλοφορία οχημάτων, οι βιομηχανικές δραστηριότητες και οι καύσεις βιομάζας, όσο και από δευτερογενείς διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα.

Η πολυπλοκότητα των μηχανισμών παραγωγής, μεταφοράς και απομάκρυνσης των συγκεκριμένων ρύπων οδηγεί σε έντονες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων τους. Η μεταβλητότητα που εμφανίζουν οι ατμοσφαιρικοί ρύποι δεν είναι τυχαία αλλά αντανακλά στην αλληλεπίδραση πολλών φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η ένταση της κυκλοφορίας, οι μεταβολές των εκπομπών, η τοπογραφία μιας περιοχής, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, τα φαινόμενα θερμοκρασιακής αναστροφής καθώς και η εποχή αποτελούν βασικούς παράγοντες που διαμορφώνουν τη χωρική και χρονική κατανομή των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων (Taylor, Jakeman, & Simpson, 1986). Στο πλαίσιο αυτό, η στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων των ρύπων αποτελεί βασικό εργαλείο στην περιβαλλοντική επιστήμη, καθώς επιτρέπει την κατανόηση της συμπεριφοράς των δεδομένων, την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης ακραίων επεισοδίων ρύπανσης, την ορθή αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και τον σχεδιασμό αποτελεσματικών περιβαλλοντικών πολιτικών (Ott, 1995).

Η στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων δεν περιορίζεται μόνο στην περιγραφή των μέσων τιμών ή της διακύμανσης των δεδομένων. Αντίθετα, επιδιώκει την κατανόηση ολόκληρης της κατανομής των συγκεντρώσεων και ιδιαίτερα της συχνότητας και της πιθανότητας εμφάνισης υψηλών τιμών, οι οποίες σχετίζονται με επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης και αυξημένο κίνδυνο για τη δημόσια υγεία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα επεισόδια αυτά δεν προκαλούνται αποκλειστικά από αυξημένες εκπομπές, αλλά από τον συνδυασμό αυξημένων εκπομπών και δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών που περιορίζουν τη διασπορά των ρύπων (Taylor et al., 1986).

## 1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση προηγούμενων μελετών

Η επιλογή της κατάλληλης στατιστικής κατανομής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια στην ανάλυση των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων, καθώς επηρεάζει τόσο την περιγραφή της στατιστικής συμπεριφοράς των δεδομένων όσο και την αξιοπιστία της εκτίμησης ακραίων συγκεντρώσεων και υπερβάσεων των ορίων ποιότητας του αέρα. Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελούν τυχαίες μεταβλητές, των οποίων η μορφή επηρεάζεται από ένα σύνθετο σύνολο παραγόντων, όπως οι πηγές εκπομπής, οι μετεωρολογικές συνθήκες, η τοπογραφία και η χρονική κλίμακα των μετρήσεων (Taylor et al., 1986· Ott, 1995).

Οι Taylor, Jakeman και Simpson (1986) υπήρξαν από τους πρώτους που πρότειναν τη χρήση θεωρητικών κατανομών πιθανότητας για την περιγραφή των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων, επισημαίνοντας ότι οι εμπειρικές χρονοσειρές εμφανίζουν συνήθως έντονη θετική ασυμμετρία και υψηλή μεταβλητότητα, χαρακτηριστικά που δεν περιγράφονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Οι συγγραφείς υποστήριξαν ότι η επιλογή της κατανομής πρέπει να βασίζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε συνόλου δεδομένων και όχι σε μία γενικευμένη υπόθεση κανονικότητας.

Οι Gokhale και Khare (2007) διερεύνησαν ειδικά τη στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) σε αστικό περιβάλλον, συγκρίνοντας διαφορετικές θεωρητικές κατανομές, και διαπίστωσαν ότι οι συγκεντρώσεις του CO παρουσιάζουν έντονη δεξιά ασυμμετρία, γεγονός που καθιστά την κανονική κατανομή λιγότερο κατάλληλη. Αν και η λογαριθμολογιστική κατανομή παρουσίασε την καλύτερη συνολική προσαρμογή, οι συγγραφείς τόνισαν ότι η αξιολόγηση πολλών κατανομών αποτελεί απαραίτητο βήμα πριν από την επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου.

Για τα αιωρούμενα σωματίδια PM10, η διεθνής βιβλιογραφία παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερη ποικιλία αποτελεσμάτων. Οι Gavriil et al. (2006), αναλύοντας δεδομένα από την Αθήνα, σύγκριναν οκτώ θεωρητικές κατανομές και κατέληξαν ότι η Pearson Type VI παρείχε την καλύτερη προσαρμογή, ενώ ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα παρουσίασαν επίσης οι κατανομές Inverse Gaussian, Lognormal και Pearson Type V. Αντίστοιχα, οι Giavis et al. (2009), συγκρίνοντας τις κατανομές Lognormal, Gamma και Weibull για ωριαίες συγκεντρώσεις PM10 στην Αθήνα και το Manchester και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η Lognormal προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα, ενώ η Gamma παρέχει επίσης ικανοποιητική προσαρμογή σε αρκετές περιπτώσεις.

Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν από τη μελέτη των Noor et al. (2011), όπου εξετάστηκαν διαφορετικές θεωρητικές κατανομές για τις συγκεντρώσεις PM10 στη Μαλαισία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανομή Gamma ήταν η καταλληλότερη για την περιοχή Nilai, ενώ για την περιοχή Shah Alam η λογαριθμοκανονική κατανομή παρουσίασε καλύτερη προσαρμογή. Η διαφοροποίηση αυτή επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει μία μοναδική κατανομή που να μπορεί να περιγράψει επαρκώς όλες τις περιπτώσεις.

Ανάλογα συμπεράσματα προέκυψαν και από τις μελέτες των Lu (2002, 2004), οι οποίες έδειξαν ότι διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και διαφορετικά περιβάλλοντα οδηγούν

σε διαφορετική στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων PM10. Στις αγροτικές περιοχές η λογαριθμοκανονική κατανομή παρουσίασε καλύτερη προσαρμογή, ενώ στις αστικές περιοχές άλλες κατανομές, όπως η εκθετική, αποδείχθηκαν καταλληλότερες.

Επιπλέον, οι Oguntunde et al. (2014) αξιολόγησαν διάφορες θεωρητικές κατανομές για δεδομένα περιβαλλοντικής ρύπανσης και διαπίστωσαν ότι οι κατανομές Gamma και Weibull περιγράφουν αποτελεσματικότερα δεδομένα με έντονη θετική ασυμμετρία και μεγάλη διασπορά συγκριτικά με την κανονική κατανομή. Αντίστοιχα, η μελέτη των Jaffar et al. (2018) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι καμία θεωρητική κατανομή δεν υπερέχει σε όλες τις εφαρμογές και ότι η επιλογή πρέπει να βασίζεται σε αντικειμενικούς ελέγχους καλής προσαρμογής.

Στην Ελλάδα, οι Papanastasiou και Melas (2010) ανέδειξαν τον σημαντικό ρόλο των μετεωρολογικών συνθηκών στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων PM10, ενώ μεταγενέστερες μελέτες επιβεβαίωσαν ότι οι τοπικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά τη στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων των ρύπων. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν ότι η καταλληλότητα μιας θεωρητικής κατανομής δεν μπορεί να γενικευθεί, αλλά πρέπει να αξιολογείται ξεχωριστά για κάθε περιοχή και κάθε ρύπο.

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στο συμπέρασμα ότι η καταλληλότητα μιας στατιστικής κατανομής για την περιγραφή ενός ρύπου δεν είναι καθολική και εφαρμόζονται διάφορες θεωρητικές κατανομές, όπως Lognormal, Κανονική, Gamma, Weibull και Pearson.

## 1.7 Ερευνητικά ερωτήματα της Διπλωματικής εργασίας

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα, ενώ η στατιστική τους συμπεριφορά επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ρύπου, τις πηγές εκπομπής, τις μετεωρολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν δείξει ότι οι συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων σπάνια ακολουθούν μια μόνο κατανομή και για τον λόγο αυτό στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν επιλεγεί διάφορες εναλλακτικές θεωρητικές κατανομές, με κυριότερες τις Lognormal, Gamma, Κανονική, Weibull και Pearson.

Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση της καταλληλότητας της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma για την περιγραφή των συγκεντρώσεων των ρύπων CO και PM10 στη Θεσσαλονίκη. Η κανονική κατανομή χρησιμοποιείται ως η κλασική θεωρητική προσέγγιση αναφοράς, ενώ η Gamma επιλέγεται επειδή αποτελεί μία από τις κατανομές που έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην περιγραφή θετικά ασύμμετρων περιβαλλοντικών δεδομένων.

Η έρευνα , επίσης, επιδιώκει να διερευνήσει τον τρόπο με τον οποίο οι διαφορές στην εποχή, στις πηγές εκπομπής και στους μηχανισμούς σχηματισμού των δύο ρύπων επηρεάζουν τη στατιστική τους συμπεριφορά.

Με βάση τα παραπάνω διαμορφώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

Ερευνητικό ερώτημα 1: Ποια από τις εξεταζόμενες στατιστικές κατανομές (Κανονική ή Gamma) περιγράφει αποτελεσματικότερα τις ωριαίες συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10);

Ερευνητικό ερώτημα 2: Πώς διαφοροποιείται η στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων μεταξύ των σταθμών μέτρησης και μεταξύ της θερμής και της ψυχρής περιόδου;

Ερευνητικό ερώτημα 3: Υπάρχουν διαφορές στην προσαρμογή των θεωρητικών κατανομών μεταξύ του CO και των PM10 και σε ποιον βαθμό αυτές σχετίζονται με τις διαφορετικές πηγές εκπομπής και τους μηχανισμούς σχηματισμού των δύο ρύπων;

Ερευνητικό ερώτημα 4: Μπορεί η στατιστική κατανομή των συγκεντρώσεων να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των ατμοσφαιρικών ρύπων και να συμβάλει στη βελτίωση της στατιστικής μοντελοποίησης και της αξιολόγησης της ποιότητας του αέρα;

Η απάντηση στα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα αναμένεται να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της στατιστικής συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων CO και PM10 στη Θεσσαλονίκη, να αναδείξει τις διαφορές μεταξύ των δύο ρύπων ως προς την προσαρμογή τους στις θεωρητικές κατανομές και να τεκμηριώσει τη χρησιμότητα της εφαρμογής κατάλληλων στατιστικών μοντέλων για την ερμηνεία και τη μελλοντική ανάλυση δεδομένων ποιότητας της ατμόσφαιρας.

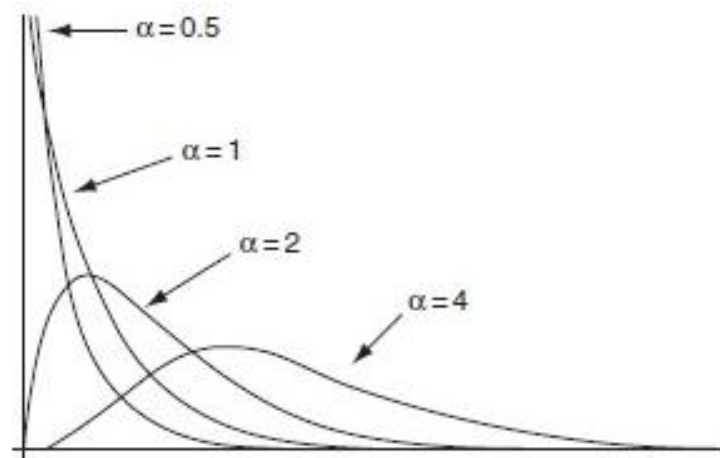
## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Μεθοδολογία διερεύνησης κατανομών ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων

Οι στατιστικές κατανομές αποτελούν βασικό εργαλείο στην ανάλυση ατμοσφαιρικών δεδομένων, καθώς επιτρέπουν την ερμηνεία και πρόβλεψη φαινομένων που χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα, διευκολύνουν τη συνοπτική περιγραφή σύνθετων δεδομένων, συμβάλλουν στην εκτίμηση ακραίων συγκεντρώσεων και της πιθανότητας υπέρβασης των θεσμοθετημένων ορίων ποιότητας του αέρα (Ott, 1995). Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων επηρεάζονται από πλήθος φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, όπως οι πηγές εκπομπής, οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι διεργασίες μεταφοράς και διασποράς στην ατμόσφαιρα. Ως αποτέλεσμα, οι κατανομές των συγκεντρώσεων συχνά παρουσιάζουν ασυμμετρία. Η επιλογή της κατάλληλης θεωρητικής κατανομής είναι κρίσιμη για την αξιόπιστη αποτύπωση της συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων των ρύπων και την ερμηνεία των φυσικών διεργασιών που διαμορφώνουν την ποιότητα του αέρα. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται η κανονική και η κατανομή Gamma, οι οποίες αποτελούν δύο από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες κατανομές στην μοντελοποίηση δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων.

### 2.1 Gamma Κατανομή

Η κατανομή Gamma είναι μια συνεχής κατανομή πιθανοτήτων που ορίζεται για θετικές τιμές τυχαίων μεταβλητών με ασύμμετρη κατανομή. Είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση μεταβλητών που δεν μπορούν να λάβουν αρνητικές τιμές και εμφανίζουν έντονη ασυμμετρία. Η μορφή της κατανομής καθορίζεται από την παράμετρο  $\alpha$ , που καθορίζει το σχήμα της κατανομής, και την παράμετρο  $\beta$ , που ορίζει τη διασπορά της κατανομής. Στην ατμοσφαιρική και υδρολογική στατιστική, η gamma κατανομή χρησιμοποιείται κυρίως για την περιγραφή ποσοτήτων υετού ή για την ανάλυση της μεταβολής των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων (Wilks, 2011). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που ορίζει την Gamma κατανομή είναι η ακόλουθη:

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad x, \alpha, \beta > 0.$$



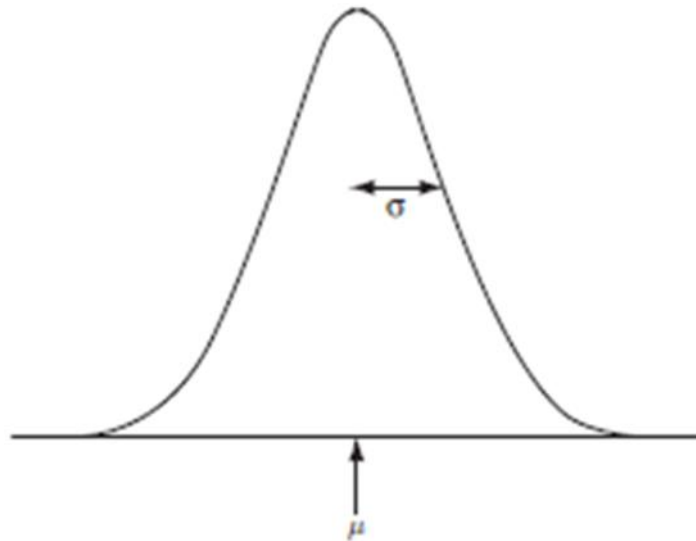
Σχήμα 1 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gamma (πηγή: Wilks, 2011)

Όσο αυξάνεται η παράμετρος σχήματος  $\alpha$ , η κατανομή γίνεται περισσότερο συμμετρική, ενώ για μικρές τιμές της εμφανίζει έντονη θετική ασυμμετρία. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την κατανομή Gamma ιδιαίτερα κατάλληλη για την περιγραφή ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων, στις οποίες παρατηρούνται συχνά λίγες αλλά ιδιαίτερα υψηλές τιμές εξαιτίας επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης.

## 2.2 Κανονική Κατανομή

Η κανονική κατανομή, γνωστή και ως κατανομή Gauss, είναι συμμετρική και ορίζεται σε όλο το πραγματικό πεδίο τιμών. Η μορφή της κατανομής καθορίζεται από δύο βασικές παραμέτρους τη μέση τιμή ( $\mu$ ) και την τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ), η οποία αποτυπώνει τη διασπορά των δεδομένων από τη μέση τιμή. Στις περιβαλλοντικές επιστήμες χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, οι οποίες εμφανίζουν συμμετρία και περιορισμένες ακραίες τιμές (Wilks, 2011). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που ορίζει την κανονική κατανομή είναι η ακόλουθη:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right], -\infty < x < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0.$$



Σχήμα 2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής (πηγή: Wilks, 2011)

## 2.3 Περιγραφή του κριτηρίου καλής προσαρμογής ( $\chi^2$ )

Για την αξιολόγηση της καλής προσαρμογής των πειραματικών δεδομένων στην κατανομή gamma χρησιμοποιείται το στατιστικό κριτήριο καλής προσαρμογής Chi-square ( $\chi^2$ ). Το  $\chi^2$  αποτελεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων της παρατηρούμενης και της αναμενόμενης συχνότητας των δεδομένων.

Για τον υπολογισμό του  $\chi^2$  απαιτείται μια σειρά από υπολογισμούς. Αρχικά, υπολογίζονται βασικά στατιστικά μεγέθη, όπως η μέση τιμή  $\mu$  (ή  $\bar{x}$ ) και η διακύμανση  $\sigma$  (ή  $s$ ). Η κανονική κατανομή προσδιορίζεται πλήρως από την μέση τιμή  $\mu$  και την διακύμανση  $\sigma$ , σε αντίθεση με την κατανομή Gamma όπου για την εκτίμηση των παραμέτρων της υπολογίζονται η παράμετρος σχήματος  $\beta$  και η παράμετρος κλίμακας  $\alpha$ . Οι σχέσεις υπολογισμού των παραμέτρων  $\alpha$  και  $\beta$  δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\hat{\alpha} = \bar{x}^2 / s^2 \quad \hat{\beta} = s^2 / \bar{x} \quad (\text{Wilks, 2011})$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παρατηρούμενες συχνότητες  $O_j$  των δεδομένων και οι αναμενόμενες συχνότητες  $E_j$ . Για τον υπολογισμό των αναμενόμενων συχνοτήτων απαιτείται ο υπολογισμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για κάθε τιμή των δεδομένων, η οποία πολλαπλασιασμένη με το συνολικό μέγεθος του δείγματος  $n$  οδηγεί στον υπολογισμό των αναμενόμενων-θεωρητικών συχνοτήτων  $E_j$ .

$$E_j = p_j \times n, \quad j = 1, \dots, m. \quad (\text{Krishnamoorthy, 2006})$$

Η απόκλιση μεταξύ των παρατηρούμενων και των θεωρητικών τιμών εκφράζεται είτε μέσω της τετραγωνικής διαφοράς τους  $(O_j - E_j)^2$  και αποτελεί βασικό στοιχείο του στατιστικού κριτηρίου καλής προσαρμογής  $\chi^2$ . Ο τύπος για τον υπολογισμό του στατιστικού κριτηρίου  $\chi^2$  είναι ο εξής:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j} \quad (\text{Krishnamoorthy, 2006})$$

Μικρές τιμές του  $\chi^2$  υποδηλώνουν ότι οι θεωρητικές συχνότητες προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες, γεγονός που υποδηλώνει καλή προσαρμογή της κατανομής στα δεδομένα. Αντίθετα, υψηλές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ θεωρίας και παρατηρήσεων.

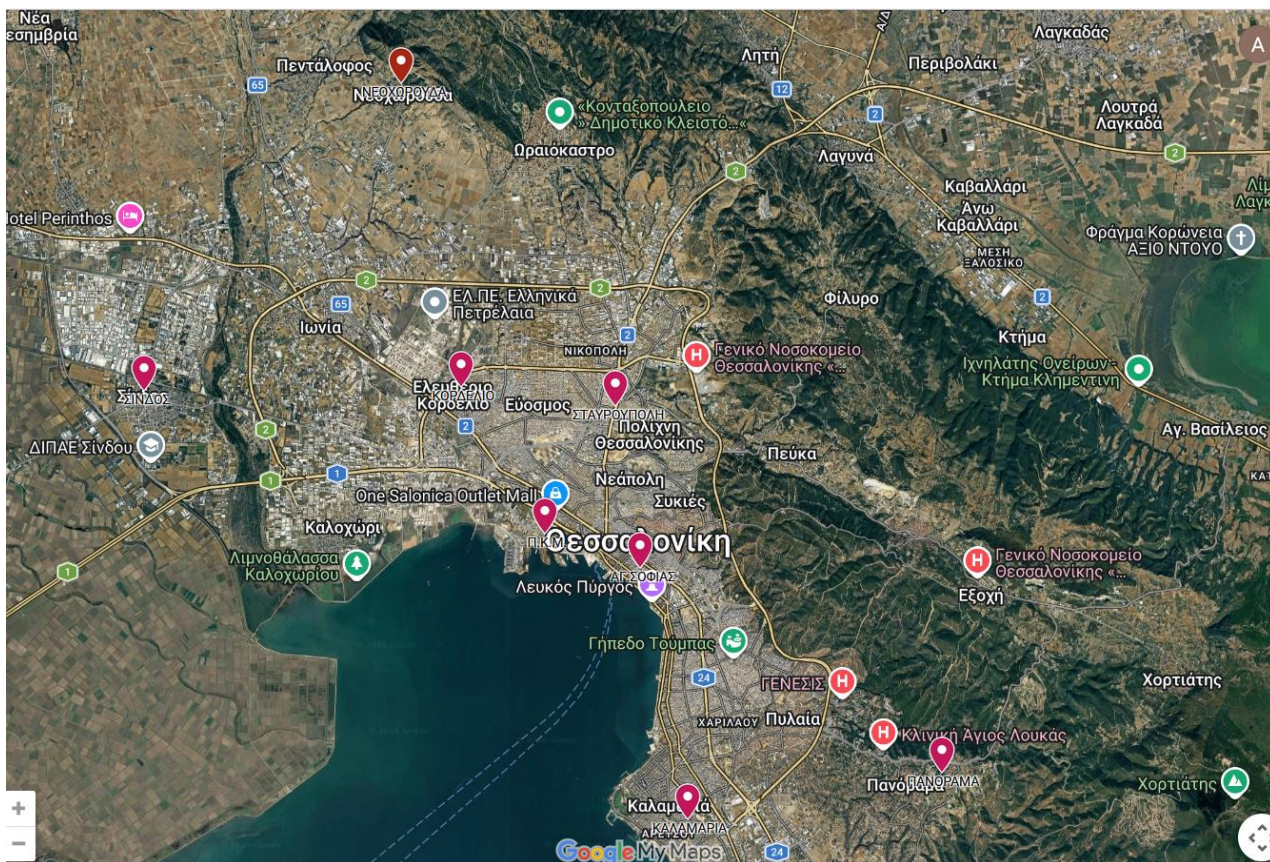
Η αξιολόγηση της προσαρμογής μιας κατανομής ως μοντέλο περιγραφής δεδομένων δεν βασίζεται αποκλειστικά στο στατιστικό κριτήριο  $\chi^2$ , αλλά συμπληρώνεται από τον συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) και από γραφικές απεικονίσεις μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων. Η ευθεία παλινδρόμησης μεταξύ των παρατηρούμενων και αναμενόμενων συχνοτήτων παρέχει πληροφορίες για τη διασπορά και τη μετατόπιση των δεδομένων και τη τιμή του συντελεστή  $R^2$ . Η τιμή του συντελεστή  $R^2$  υποδηλώνει την γραμμική συσχέτιση των δεδομένων. Αν η τιμή  $R^2$  είναι 1 υπάρχει απόλυτη γραμμική συσχέτιση, ενώ αν η τιμή είναι 0 δεν υπάρχει καμία συσχέτιση. Αν η τιμή κυμαίνεται από 0 έως 1 υπάρχει μερική συσχέτιση.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Μελέτη Περίπτωσης

### 3.1 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, η οποία αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο πολεοδομικό συγκρότημα της Ελλάδας και ένα από τα σημαντικότερα αστικά, βιομηχανικά και εμπορικά κέντρα της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Σύμφωνα με την Απογραφή Πληθυσμού της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ, 2021) ο μόνιμος πληθυσμός της Θεσσαλονίκης ανέρχεται σε 1.006.112 κατοίκους, γεγονός που την κατατάσσει σε μια από τις πιο πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές της χώρας.

Η πόλη βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Ελλάδας, στις γεωγραφικές συντεταγμένες 40.656<sup>ο</sup> Β και 22.934<sup>ο</sup> Α, και αναπτύσσεται κατά μήκος του βόρειου παραλιακού μετώπου του Θερμαϊκού Κόλπου καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 19,3 km<sup>2</sup> για τον Δήμο Θεσσαλονίκης. Η στρατηγική γεωγραφική της θέση, σε συνδυασμό με τη λειτουργία του λιμένα, του διεθνούς αεροδρομίου και του εκτεταμένου οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου, έχει διαμορφώσει διαχρονικά τη Θεσσαλονίκη ως βασικό συγκοινωνιακό και εμπορικό κόμβο της Βόρειας Ελλάδας και της ευρύτερης Βαλκανικής χερσονήσου (Mermigkas et al., 2025).



Εικόνα 1 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης της Θεσσαλονίκης (πηγή: my Google maps)

Η περιοχή χωροθετείται στο βόρειο παραλιακό μέτωπο του Θερμαϊκού κόλπου έως τις βορειοανατολικές παρυφές του όρους Χορτιάτη, ενώ δυτικά συνορεύει με τις πεδινές εκτάσεις της ηπειρωτικής Μακεδονίας (Kassomenos et al., 2011). Η γεωμορφολογία της περιοχής παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις, καθώς το δυτικό τμήμα χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες πεδινές εκτάσεις όπου συγκεντρώνονται οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και κύριοι οδικοί άξονες, ενώ το ανατολικό τμήμα παρουσιάζει περισσότερο λοφώδη μορφολογία, η οποία καταλήγει στον ορεινό όγκο του Χορτιάτη.

Η γεωγραφική θέση της Θεσσαλονίκης σε συνδυασμό με την μορφολογία της δημιουργεί ένα σύνθετο περιβάλλον ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, το οποίο επηρεάζει τη διασπορά και τη χωρική κατανομή των ατμοσφαιρικών ρύπων (Moussiopoulos et al., 2009). Συγκεκριμένα, η παρουσία του Θερμαϊκού Κόλπου και του ορεινού όγκου του Χορτιάτη δημιουργεί μια κλειστή λεκάνη που περιορίζει τον φυσικό αερισμό της περιοχής και σε συνδυασμό με την πυκνή αστική δόμηση συμβάλλει στη συσσώρευση ατμοσφαιρικών ρύπων (Moussiopoulos et al., 2009). Οι Papanastasiou & Melas (2010) αναφέρουν ότι μετεωρολογικές συνθήκες περιορισμένης διασποράς, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές, παγιδεύουν τους ρύπους στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και αυξάνονται οι συγκεντρώσεις τους. Σύμφωνα με την μελέτη του Maggos et al. (2025) οι συγκεντρώσεις των ρύπων στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης επηρεάζονται από την θαλάσσια αύρα του Θερμαϊκού κόλπου που μεταφέρει αέριες μάζες ρύπων από το δυτικό τμήμα της, όπου εντοπίζονται βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι κύριοι οδικοί άξονες προς το κέντρο της πόλης

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται μεσογειακό με ήπιους και υγρούς χειμώνες και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας η μέση μηνιαία θερμοκρασία της Θεσσαλονίκης κυμαίνεται από 5,4°C τον Ιανουάριο έως 26,9°C τον Ιούλιο ενώ η μέση τιμή υγρασίας φτάνει το 77,9% τον Δεκέμβριο και το 52,7% τον Ιούλιο. Οι επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή είναι βορειοδυτικοί και η μέση μηνιαία ένταση ανέμου κυμαίνεται από 4,9 τον Νοέμβριο έως 6,4 τον Ιούλιο.

Οι μετεωρολογικές συνθήκες αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που διαμορφώνουν την ποιότητα του αέρα στην περιοχή. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου παρατηρούνται συχνά συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας και θερμοκρασιακών αναστροφών, οι οποίες περιορίζουν την κατακόρυφη ανάμιξη της ατμόσφαιρας και οδηγούν στον εγκλωβισμό των ρύπων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Papanastasiou & Melas, 2010). Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία ευνοεί την ανάπτυξη φωτοχημικών αντιδράσεων, οι οποίες οδηγούν στον σχηματισμό δευτερογενών ρύπων, όπως το τροποσφαιρικό όζον (O<sub>3</sub>). Επιπλέον, η θαλάσσια αύρα που αναπτύσσεται στον Θερμαϊκό Κόλπο μεταφέρει αέριες μάζες από τις δυτικές βιομηχανικές περιοχές προς το κέντρο και τις ανατολικές συνοικίες της πόλης, συμβάλλοντας στη χωρική ανακατανομή των ατμοσφαιρικών ρύπων (Maggos et al., 2025).

### 3.2 Η ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

Η Θεσσαλονίκη αντιμετωπίζει διαχρονικά σημαντικά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τα οποία οφείλονται στον συνδυασμό έντονων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών. Σύμφωνα με την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2024) στην περιοχή της Θεσσαλονίκης καταγράφονται υπερβάσεις των ορίων για βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, κυρίως για τα αιωρούμενα σωματίδια PM10 και PM2.5, ενώ σε συγκεκριμένους σταθμούς παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και όζοντος (O<sub>3</sub>).

Οι κυριότερες πηγές εκπομπών περιλαμβάνουν τις οδικές μεταφορές, τη βιομηχανική δραστηριότητα την οικιακή θέρμανση (Chatzopoulou & Mavroidis, 2025). Ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται η συμβολή των οδικών μεταφορών, οι οποίες αποτελούν τη βασικότερη πηγή εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), ενώ συνεισφέρουν σημαντικά και στις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Η μελέτη των Liora et al. (2021) έδειξε ότι κατά τις περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης παρατηρούνται σημαντικές αυξήσεις των συγκεντρώσεων CO, NO<sub>x</sub> και πρωτογενών αιωρούμενων σωματιδίων στους κύριους οδικούς άξονες της πόλης (Liora et al., 2021). Οι εκπομπές ρύπων από οδικές μεταφορές παρουσιάζουν έντονη χωρική μεταβλητότητα με αυξημένες συγκεντρώσεις σε περιοχές υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου, γεγονός που επιβεβαιώνει τη στενή σύνδεση των μεταφορών και της ποιότητας του αέρα των αστικών κέντρων (Liora et al., 2025).

Σημαντική είναι επίσης η συμβολή της οικιακής θέρμανσης, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο όπου η χρήση βιομάζας και στερεών καυσίμων αυξάνει σημαντικά τις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων PM10 και PM2.5, οργανικού άνθρακα και δευτερογενών ανόργανων αερολυμάτων. Σύμφωνα με τους Tsiaousidis et al. (2023) οι εκπομπές αυτές παρουσιάζουν έντονη εποχική μεταβολή με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις να καταγράφονται τους χειμερινούς μήνες, ενώ κατά τη θερινή περίοδο κυριαρχούν οι φωτοχημικές διεργασίες που οδηγούν στον σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων και όζοντος. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζεται χωρική και χρονική μεταβλητότητα στις συγκεντρώσεις των ρύπων και οι χρονοσειρές των συγκεντρώσεων εμφανίζουν έντονη ασυμμετρία, μεγάλη διακύμανση και συχνά ακραίες τιμές.

Η πολυπλοκότητα της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης την καθιστά ιδανική περιοχή για τη μελέτη της στατιστικής συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την καταλληλότητα της κανονικής και της κατανομής Gamma για την περιγραφή των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Μέσω της σύγκρισης των δύο θεωρητικών κατανομών αξιολογείται ποιο στατιστικό μοντέλο προσαρμόζεται αποτελεσματικότερα στα εμπειρικά δεδομένα και περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων των δύο ρύπων. Η διερεύνηση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη μαθηματική προσαρμογή των δεδομένων, αλλά συμβάλλει και στην καλύτερη κατανόηση των φυσικών διεργασιών που επηρεάζουν την εκπομπή, τη μεταφορά και τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων,

παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και την υποστήριξη μελλοντικών δράσεων περιβαλλοντικής διαχείρισης.

### 3.3 Συλλογή δεδομένων

Τα δεδομένα των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων προέρχονται από επίγειους αυτόματους σταθμούς μέτρησης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας αυτόματος σταθμός μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην θέση Αγία Σοφία στην Θεσσαλονίκη.

Οι σταθμοί παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης διακρίνονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με την ιδιότητα τους:

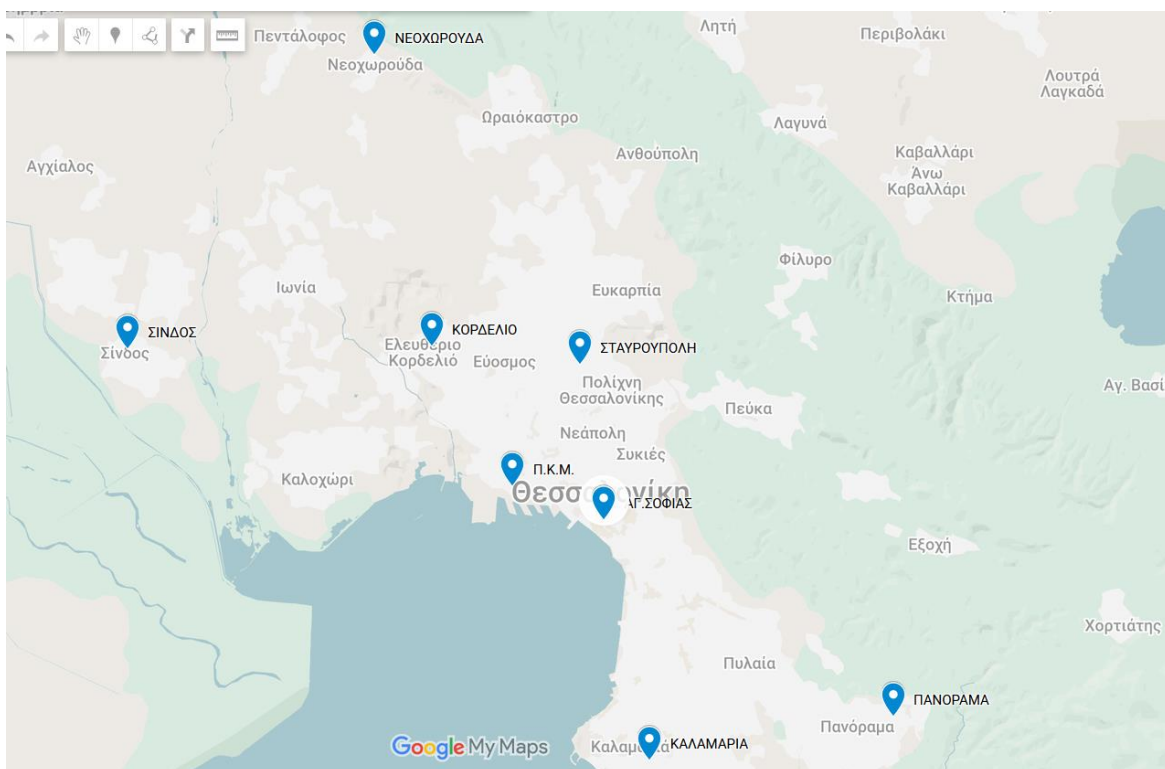
- Κυκλοφορίας: αφορούν σταθμούς τοποθετημένους σε κεντρικούς δρόμους
- Βιομηχανικοί: αφορούν σταθμούς τοποθετημένους σε βιομηχανικές περιοχές
- Υποβάθρου: αφορούν σταθμούς τοποθετημένους σε απόσταση από θέσης έντονης ρύπανσης

Οι μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων πραγματοποιούνται όλο το εικοσιτετράωρο ενώ στους μετρούμενους ρύπους περιλαμβάνονται το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), το όζον ( $\text{O}_3$ ), τα αιωρούμενα σωματίδια  $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$ , το βενζόλιο, τα βαρέα μέταλλα, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες και το βενζοπυρένιο. Κάθε χρόνο δημοσιεύεται τεχνική έκθεση ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η οποία περιλαμβάνει τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων με πληροφορίες για πιθανές υπερβάσεις των επιτρεπόμενων ορίων των ρύπων.



**Εικόνα 2 Σταθμός Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην θέση Αγ. Σοφία (πηγή: Google maps)**

Στην περιοχή της Θεσσαλονίκης οι ρύποι καταγράφονται από το δίκτυο των σταθμών της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας που περιλαμβάνει οκτώ σταθμούς σε θέσεις που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά μικροκλίματα. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ονόματα, οι θέσεις, ο χαρακτηρισμός των σταθμών ενώ στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ευρύτερος χάρτης της Θεσσαλονίκης με τις θέσεις των σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας.



**Εικόνα 3 Χάρτης σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (πηγή: ίδια επεξεργασία)**

| Όνομα Σταθμού     | Θέση    |         | Υψόμετρο | Χαρακτηρισμός                      | Μετρούμενοι ρύποι |      |
|-------------------|---------|---------|----------|------------------------------------|-------------------|------|
|                   | ΕΓΣΑ 87 |         |          |                                    | CO                | PM10 |
|                   | X (m)   | Y (m)   |          |                                    |                   |      |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ (AGS)    | 410641  | 4498347 | 12       | Αστικός-Κυκλοφορίας                | X                 | X    |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ (STA) | 410070  | 4502296 | 42       | Αστικός-Κυκλοφορίας                | X                 | X    |
| Π.Κ.Μ. (PKM)      | 408306  | 4499223 | 4        | Παρακολούθησης Αστικός-Κυκλοφορίας |                   | X    |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ (KAL)   | 411715  | 4492230 | 60       | Αστικός-Υποβάθρου                  | X                 | X    |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ (KOD)    | 406309  | 4502811 | 30       | Αστικός-Βιομηχανικός               | X                 | X    |
| ΣΙΝΔΟΣ (SIN)      | 398590  | 4501179 | 14       | Περιαστικός-Βιομηχανικός           | X                 | X    |
| ΠΑΝΟΡΑΜΑ (PAO)    | 417909  | 4493289 | 363      | Περιαστικός-Υποβάθρου              |                   | X    |
| ΝΕΟΧΩΡΟΥΔΑ (NEO)  | 404953  | 4510195 | 229      | Περιαστικός-Υποβάθρου              |                   | X    |

**Πίνακας 1 Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας του ΕΔΠΑΡ (πηγή: ΥΠΕΝ)**

Οι οκτώ σταθμοί μέτρησης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας που αναφέρονται στον Πίνακα 1 όπως προκύπτει αναφέρονται σε διαφορετικές κατηγορίες περιβάλλοντος και αυτό καθιστά δυνατή την αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης τόσο σε περιοχές με έντονες τοπικές εκπομπές όσο και σε περιφερειακές περιοχές με χαμηλότερες τοπικές εκπομπές. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί Αγίας Σοφίας (AGS), Σταυρούπολης (STA) και

Π.Κ.Μ. (PKM) χαρακτηρίζονται ως σταθμοί αστικοί-κυκλοφορίας, καθώς βρίσκονται σε περιοχές με έντονο κυκλοφοριακό φόρτο και οι μετρήσεις τους επηρεάζονται κυρίως από τις εκπομπές των οχημάτων.

Ο σταθμός Καλαμαριάς (KAL) χαρακτηρίζεται ως αστικός-υποβάθρου καταγράφοντας τις συγκεντρώσεις που επικρατούν σε κατοικημένη περιοχή με περιορισμένη άμεση επίδραση από έντονες πηγές εκπομπών. Αντίθετα, οι σταθμοί Κορδελιό (KOD) και Σίνδος (SIN) χαρακτηρίζονται ως βιομηχανικοί, καθώς βρίσκονται σε περιοχές με βιομηχανικές εγκαταστάσεις και επηρεάζονται τόσο από την αστική δραστηριότητα γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ρύπων.

Τέλος, οι σταθμοί Πανοράματος (PAO) και Νεοχωρούδας (NEO) αποτελούν περιφερειακούς σταθμούς υποβάθρου εγκατεστημένους σε περιοχές με χαμηλότερη ένταση τοπικών εκπομπών. Οι μετρήσεις τους αντανακλούν κυρίως τη γενικότερη ποιότητα της ατμόσφαιρας και την επίδραση της περιφερειακής μεταφοράς των ρύπων, ενώ επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από άμεσες τοπικές πηγές.

### 3.4 Επεξεργασία δεδομένων

Η μελέτη επικεντρώνεται σε δυο ατμοσφαιρικούς ρύπους το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM10) με δεδομένα συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων που προέρχονται από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Για τον ρύπο μονοξείδιο του άνθρακα (CO) χρησιμοποιήθηκαν ωριαίες συγκεντρώσεις για το χρονικό διάστημα 2001–2024, ενώ για τα αιωρούμενα σωματίδια PM10 χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες συγκεντρώσεις για την περίοδο 2001–2016 και ωριαίες συγκεντρώσεις για την περίοδο 2017–2024, σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων του δικτύου παρακολούθησης.

Η επιλογή της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου επιτρέπει τη διερεύνηση της μακροχρόνιας μεταβολής των συγκεντρώσεων των ρύπων, καθώς και την αξιολόγηση της στατιστικής συμπεριφοράς τους σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες.

Πριν από τη στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε προεπεξεργασία των δεδομένων με σκοπό τη διασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας τους. Αρχικά, τα αρχεία που διατέθηκαν σε μορφή *.dat* μετατράπηκαν σε μορφή συμβατή με το λογισμικό Microsoft Excel (*.xls*), προκειμένου να διευκολυνθεί η επεξεργασία τους.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος ποιότητας των δεδομένων και εντοπίστηκαν οι μη έγκυρες καταγραφές. Οι τιμές που είχαν κωδικοποιηθεί ως –9999, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης, θεωρήθηκαν ελλειπείς παρατηρήσεις και αντικαταστάθηκαν από την τιμή NA (Not Available), ώστε να εξαιρεθούν από τους στατιστικούς υπολογισμούς χωρίς να επηρεαστεί η ακεραιότητα των χρονοσειρών.

Ακολούθως υπολογίστηκαν οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις των δύο ρύπων για κάθε σταθμό μέτρησης. Επιπλέον, τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε θερμή και ψυχρή περίοδο,

ώστε να διερευνηθεί η πιθανή εποχική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων. Για την οπτική διερεύνηση της χρονικής μεταβολής δημιουργήθηκαν διαγράμματα ετήσιας διακύμανσης των συγκεντρώσεων για κάθε σταθμό.

Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της καταλληλότητας της Κανονικής και της κατανομής Gamma για την περιγραφή των συγκεντρώσεων των ρύπων CO και PM<sub>10</sub>. Για κάθε σταθμό υπολογίστηκαν οι θεωρητικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των δύο κατανομών και εκτιμήθηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες συχνότητες εμφάνισης των συγκεντρώσεων και συγκρίθηκαν με τις παρατηρούμενες συχνότητες των δεδομένων. Για τη διευκόλυνση της σύγκρισης πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση των θεωρητικών πιθανοτήτων, ώστε το άθροισμά τους να ισούται με τη μονάδα και να είναι δυνατός ο ορθός υπολογισμός των αναμενόμενων συχνοτήτων.

Η αξιολόγηση της προσαρμογής των θεωρητικών κατανομών πραγματοποιήθηκε μέσω του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ), ο οποίος εκφράζει τον βαθμό συμφωνίας μεταξύ των θεωρητικών και των παρατηρούμενων συχνοτήτων. Παράλληλα υπολογίστηκαν οι θετικές και αρνητικές αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και παρατηρούμενων τιμών, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των δύο κατανομών σε όλο το εύρος των συγκεντρώσεων.

Για την οπτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν: διαγράμματα σύγκρισης παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων και διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων.

### **3.5 Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων CO κατά τη θερμή και ψυχρή περίοδο την περίοδο 2001-2024**

Η ανάλυση των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) για την περίοδο 2001–2024 στους πέντε σταθμούς μέτρησης της Θεσσαλονίκης (Αγίας Σοφίας, Καλαμαριά, Κορδελιό, Σίνδος και Σταυρούπολης) αναδεικνύει σαφείς χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις, καθώς και έντονη εποχικότητα.

Ειδικότερα, παρατηρείται μακροχρόνια πτωτική τάση των συγκεντρώσεων CO σε όλους τους σταθμούς από τις αρχές της δεκαετίας του 2001 έως περίπου το 2015, ενώ ακολουθεί σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων CO και σταδιακή σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων σε χαμηλότερα επίπεδα.

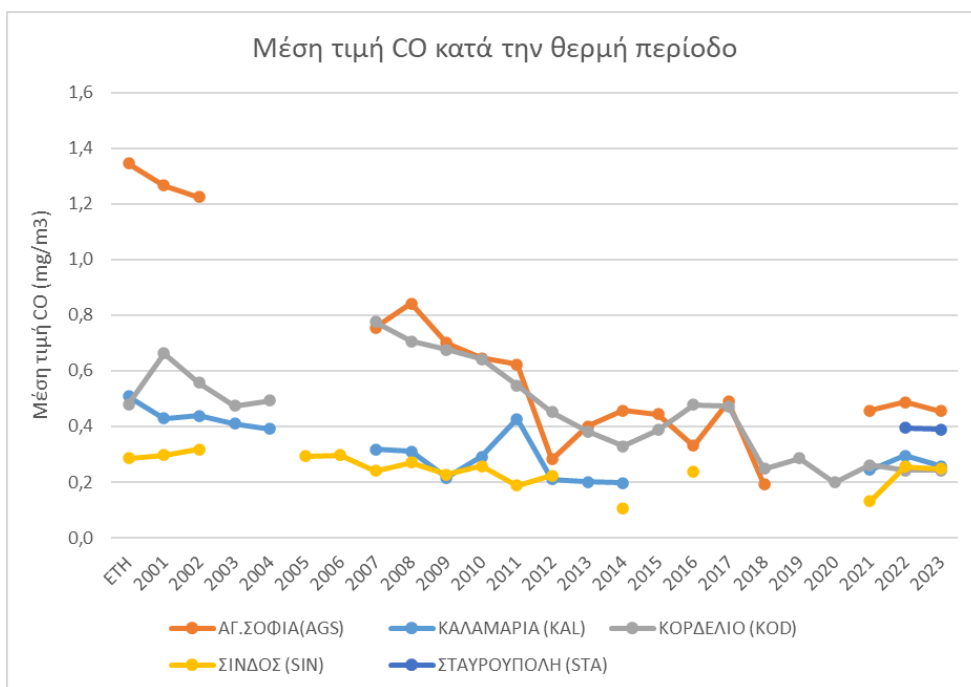
Η σύγκριση μεταξύ θερμής (Μάιος–Σεπτέμβριος) και ψυχρής περιόδου (Οκτώβριος–Απρίλιος) καταδεικνύει έντονη εποχική διαφοροποίηση. Κατά την ψυχρή περίοδο οι μέσες συγκεντρώσεις CO καταγράφονται υψηλότερες σε σχέση με τη θερμή, ενώ εμφανίζουν και μεγαλύτερη διακύμανση, όπως προκύπτει από τους Πίνακες 2 και 3 και τα Διαγράμματα 1 και 2. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη χρήση

συστημάτων θέρμανσης (καύση βιομάζας και στερεών καυσίμων) κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς και στις δυσμενέστερες μετεωρολογικές συνθήκες διασποράς των ρύπων, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές και το χαμηλό ύψος ανάμιξης της ατμόσφαιρας. Αντιθέτως, κατά τη θερμή περίοδο οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται χαμηλότερες και περισσότερο ομοιόμορφες, γεγονός που σχετίζεται με την αυξημένη ακτινοβολία και την ατμοσφαιρική ανάμιξη που ευνοούν τη διασπορά των ρύπων, οδηγώντας σε χαμηλότερες και πιο ομοιόμορφες συγκεντρώσεις (Seinfeld & Pandis, 2016).

Η χωρική ανάλυση των δεδομένων των σταθμών μέτρησης παρουσιάζει διαφοροποιήσεις που προκύπτουν ανάλογα με τον τύπο του σταθμού και τις τοπικές εκπομπές ρύπανσης. Ο σταθμός Αγίας Σοφίας (αστικός-κυκλοφορίας) καταγράφει τις υψηλότερες μέσες τιμές συγκεντρώσεων CO, γεγονός που επιβεβαιώνει την ισχυρή επίδραση της οδικής κυκλοφορίας στις εκπομπές του ρύπου. Παρόμοια αλλά ηπιότερη συμπεριφορά παρουσιάζει και ο σταθμός Σταυρούπολης, ο οποίος επίσης χαρακτηρίζεται ως αστικός-κυκλοφορίας. Αντιθέτως, ο σταθμός Καλαμαριάς (αστικός-υποβάθρου) εμφανίζει χαμηλότερες συγκεντρώσεις και μικρότερη διακύμανση, στοιχείο που υποδηλώνει ότι οι μετρούμενες τιμές αντιπροσωπεύουν κυρίως τα επίπεδα υποβάθρου της αστικής ατμόσφαιρας, χωρίς επίδραση τοπικών πηγών ρύπανσης.

Ο σταθμός Κορδελιό (αστικός-βιομηχανικός) εμφανίζει σχετικά αυξημένες τιμές, υποδηλώνοντας την επίδραση τόσο της βιομηχανικής δραστηριότητας όσο και των αστικών εκπομπών. Τέλος, ο σταθμός Σίνδος (περιαστικός-βιομηχανικός) καταγράφει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις, υποδεικνύοντας μικρότερη επιβάρυνση από αστικές πηγές λόγω απομάκρυνσης και μεγαλύτερη δυνατότητα διασποράς των ρύπων σε λιγότερο δομημένο περιβάλλον.

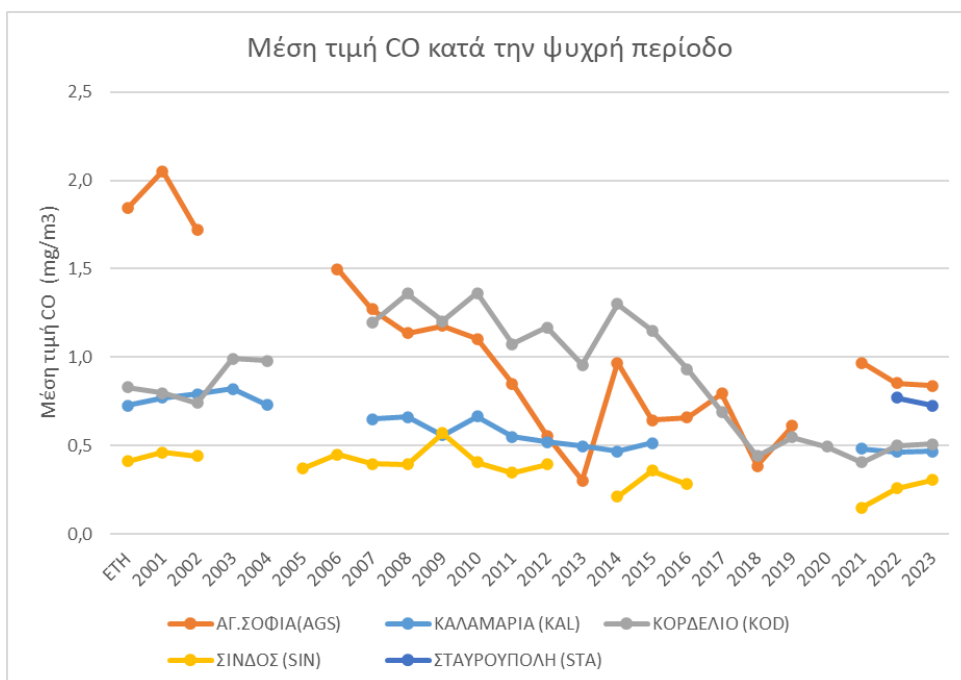
Συνολικά, τα αποτελέσματα της διαχρονικής εξέλιξης των συγκεντρώσεων CO επιβεβαιώνουν ότι παρά τη σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων CO στη Θεσσαλονίκη κατά την περίοδο 2001-2024 οι χωρικές και εποχικές διαφοροποιήσεις παραμένουν έντονες. Η διατήρηση υψηλότερων τιμών κατά τη χειμερινή περίοδο και σε σταθμούς κυκλοφορίας υποδεικνύει την ανάγκη συνέχισης και ενίσχυσης των πολιτικών διαχείρισης της κυκλοφορίας και περιορισμού των εκπομπών από τη θέρμανση, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα με δυσμενείς συνθήκες διασποράς.



Διάγραμμα 1 Χρονοσειρά μέσης τιμής CO κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ CO ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (ΜΑΙΟΣ-ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ) |               |                 |                |              |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------|
| ΕΤΗ                                                                             | ΑΓ.ΣΟΦΙΑ(AGS) | ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ (KAL) | ΚΟΡΔΕΛΙΟ (KOD) | ΣΙΝΔΟΣ (SIN) | ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ (STA) |
| 2001                                                                            | 1,3           | 0,5             | 0,5            | 0,3          |                   |
| 2002                                                                            | 1,3           | 0,4             | 0,7            | 0,3          |                   |
| 2003                                                                            | 1,2           | 0,4             | 0,6            | 0,3          |                   |
| 2004                                                                            |               | 0,4             | 0,5            |              |                   |
| 2005                                                                            |               | 0,4             | 0,5            |              |                   |
| 2006                                                                            |               |                 |                | 0,3          |                   |
| 2007                                                                            |               |                 |                | 0,3          |                   |
| 2008                                                                            | 0,8           | 0,3             | 0,8            | 0,2          |                   |
| 2009                                                                            | 0,8           | 0,3             | 0,7            | 0,3          |                   |
| 2010                                                                            | 0,7           | 0,2             | 0,7            | 0,2          |                   |
| 2011                                                                            | 0,6           | 0,3             | 0,6            | 0,3          |                   |
| 2012                                                                            | 0,6           | 0,4             | 0,5            | 0,2          |                   |
| 2013                                                                            | 0,3           | 0,2             | 0,5            | 0,2          |                   |
| 2014                                                                            | 0,4           | 0,2             | 0,4            |              |                   |
| 2015                                                                            | 0,5           | 0,2             | 0,3            | 0,1          |                   |
| 2016                                                                            | 0,4           |                 | 0,4            |              |                   |
| 2017                                                                            | 0,3           |                 | 0,5            | 0,2          |                   |
| 2018                                                                            | 0,5           |                 | 0,5            |              |                   |
| 2019                                                                            | 0,2           |                 | 0,2            |              |                   |
| 2020                                                                            |               |                 | 0,3            |              |                   |
| 2021                                                                            |               |                 | 0,2            |              |                   |
| 2022                                                                            | 0,5           | 0,2             | 0,3            | 0,1          |                   |
| 2023                                                                            | 0,5           | 0,3             | 0,2            | 0,3          | 0,4               |
| 2024                                                                            | 0,5           | 0,3             | 0,2            | 0,2          | 0,4               |

Πίνακας 2 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων CO κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης



Διάγραμμα 2 Χρονοσειρά μέσης τιμής CO κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ CO ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ-ΑΠΡΙΛΙΟΣ) |               |                 |                |              |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------|
| ΕΤΗ                                                                              | ΑΓ.ΣΟΦΙΑ(ΑΓΣ) | ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ (ΚΑΛ) | ΚΟΡΔΕΛΙΟ (ΚΟΔ) | ΣΙΝΔΟΣ (ΣΙΝ) | ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ (ΣΤΑ) |
| 2001                                                                             | 1,8           | 0,7             | 0,8            | 0,4          |                   |
| 2002                                                                             | 2,1           | 0,8             | 0,8            | 0,5          |                   |
| 2003                                                                             | 1,7           | 0,8             | 0,7            | 0,4          |                   |
| 2004                                                                             |               | 0,8             | 1,0            |              |                   |
| 2005                                                                             |               | 0,7             | 1,0            |              |                   |
| 2006                                                                             |               |                 |                | 0,4          |                   |
| 2007                                                                             | 1,5           |                 |                | 0,4          |                   |
| 2008                                                                             | 1,3           | 0,6             | 1,2            | 0,4          |                   |
| 2009                                                                             | 1,1           | 0,7             | 1,4            | 0,4          |                   |
| 2010                                                                             | 1,2           | 0,6             | 1,2            | 0,6          |                   |
| 2011                                                                             | 1,1           | 0,7             | 1,4            | 0,4          |                   |
| 2012                                                                             | 0,8           | 0,6             | 1,1            | 0,3          |                   |
| 2013                                                                             | 0,6           | 0,5             | 1,2            | 0,4          |                   |
| 2014                                                                             | 0,3           | 0,5             | 1,0            |              |                   |
| 2015                                                                             | 1,0           | 0,5             | 1,3            | 0,2          |                   |
| 2016                                                                             | 0,6           | 0,5             | 1,2            | 0,4          |                   |
| 2017                                                                             | 0,7           |                 | 0,9            | 0,3          |                   |
| 2018                                                                             | 0,8           |                 | 0,7            |              |                   |
| 2019                                                                             | 0,4           |                 | 0,4            |              |                   |
| 2020                                                                             | 0,6           |                 | 0,5            |              |                   |
| 2021                                                                             |               |                 | 0,5            |              |                   |
| 2022                                                                             | 1,0           | 0,5             | 0,4            | 0,1          |                   |
| 2023                                                                             | 0,9           | 0,5             | 0,5            | 0,3          | 0,8               |
| 2024                                                                             | 0,8           | 0,5             | 0,5            | 0,3          | 0,7               |

Πίνακας 3 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων CO κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

### 3.6 Εφαρμογή και Αξιολόγηση Κατανομών στα ωριαία δεδομένα CO της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2001-2024

Η αξιολόγηση της καταλληλότητας της κανονικής και της κατανομής Gamma πραγματοποιήθηκε για τις ωριαίες συγκεντρώσεις CO για την χρονική περίοδο 2001-2024 στους πέντε σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης (Αγία Σοφία, Σταυρούπολη, Κορδελιό, Σίνδος και Καλαμαριά) με τη χρήση του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και του στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$  (Chi-square).

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4, από τον οποίο προκύπτει ότι η κατανομή Gamma εμφανίζει καλύτερη προσαρμογή από την κανονική κατανομή σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς. Ειδικότερα, η Gamma παρουσιάζει υψηλότερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και ταυτόχρονα χαμηλότερες τιμές του δείκτη  $\chi^2$  (Chi-square), γεγονός που υποδηλώνει σημαντικά καλύτερη προσαρμογή στα πραγματικά δεδομένα. Αντίθετα, η κανονική κατανομή εμφανίζει αισθητά χαμηλότερες τιμές  $R^2$  και υψηλότερες τιμές  $\chi^2$ , γεγονός που καταδεικνύει ότι αδυνατεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων CO.

| ΣΤΑΘΜΟΙ CO                           | Κατανομή | Συντελεστής $R^2$ |                   |                   | Chi-square ( $\chi^2$ ) |                   |                   |
|--------------------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
|                                      |          |                   | Θερμή<br>περίοδος | Ψυχρή<br>περίοδος |                         | Θερμή<br>περίοδος | Ψυχρή<br>περίοδος |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)    | Gamma    | 0,93              | 0,94              | 0,94              | 2232571                 | 1296341           | 337202,54         |
|                                      | Κανονική | 0,74              | 0,76              | 0,76              | 2,43E+95                | 1,3E+70           | 1,16E+71          |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ<br>(Αστικός Υποβάθρου)     | Gamma    | 0,81              | 0,81              | 0,85              | 2,65E+12                | 5,7E+31           | 11597,90          |
|                                      | Κανονική | 0,64              | 0,72              | 0,68              | 1,7E+230                | 8,6E+136          | 5,24E+27          |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ<br>(Αστικός Βιομηχανικός)   | Gamma    | 0,84              | 0,98              | 0,79              | 518063,8                | 1323840           | 57640,19          |
|                                      | Κανονική | 0,67              | 0,86              | 0,65              | 1,5E+106                | 1,46E+68          | 2,81E+70          |
| ΣΙΝΔΟΣ<br>(Περιαστικός Βιομηχανικός) | Gamma    | 0,75              | 0,96              | 0,67              | 9,32E+17                | 1,39E+40          | 4,69E+12          |
|                                      | Κανονική | 0,73              | 0,95              | 0,68              | 2,8E+290                | 3,3E+283          | 9,70E+299         |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας) | Gamma    | 0,69              | 0,92              | 0,87              | 6602,48                 | 889,51            | 1580,62           |
|                                      | Κανονική | 0,54              | 0,76              | 0,58              | 7,59E+30                | 5779947           | 1,11E+20          |

**Πίνακας 4 Πίνακας συντελεστών  $R^2$  και  $\chi^2$  της κανονικής κατανομής και της gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις CO**

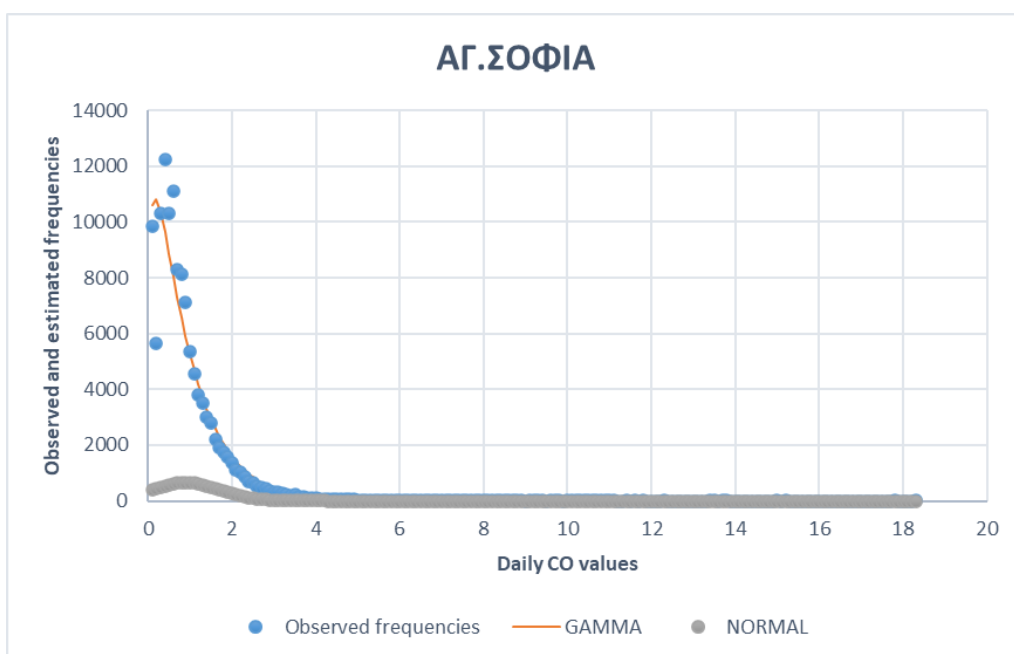
Η καταλληλότητα της κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα συσχέτισης παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων. Σε όλους τους σταθμούς οι συγκεντρώσεις CO παρουσιάζουν έντονη θετική ασυμμετρία, με τη μεγάλη πλειονότητα των παρατηρήσεων να συγκεντρώνεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις και με την παρουσία μιας εκτεταμένης δεξιάς ουράς, η οποία αντιστοιχεί σε επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων. Αυτή η μορφή των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων CO αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των πρωτογενών ατμοσφαιρικών ρύπων, οι οποίοι επηρεάζονται άμεσα από τις τοπικές πηγές εκπομπών και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Η μορφή των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων CO δεν μπορεί να αποδοθεί ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή, η οποία, λόγω της συμμετρικής της φύσης, υποεκτιμά τις υψηλές συγκεντρώσεις και παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις τόσο στην

κορυφή όσο και στη δεξιά ουρά των διαγραμμάτων. Αντίθετα, η κατανομή Gamma ως ασύμμετρη κατανομή αναπαριστά αποτελεσματικότερα τη μορφή των δεδομένων, περιγράφοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο τις συχνότερες όσο και τις ακραίες συγκεντρώσεις.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή και σχολιασμός των διαγραμμάτων σύγκρισης παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων και των διαγραμμάτων γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων για κάθε σταθμό για το σύνολο των δεδομένων και για τις περιόδους, θερμή και ψυχρή.

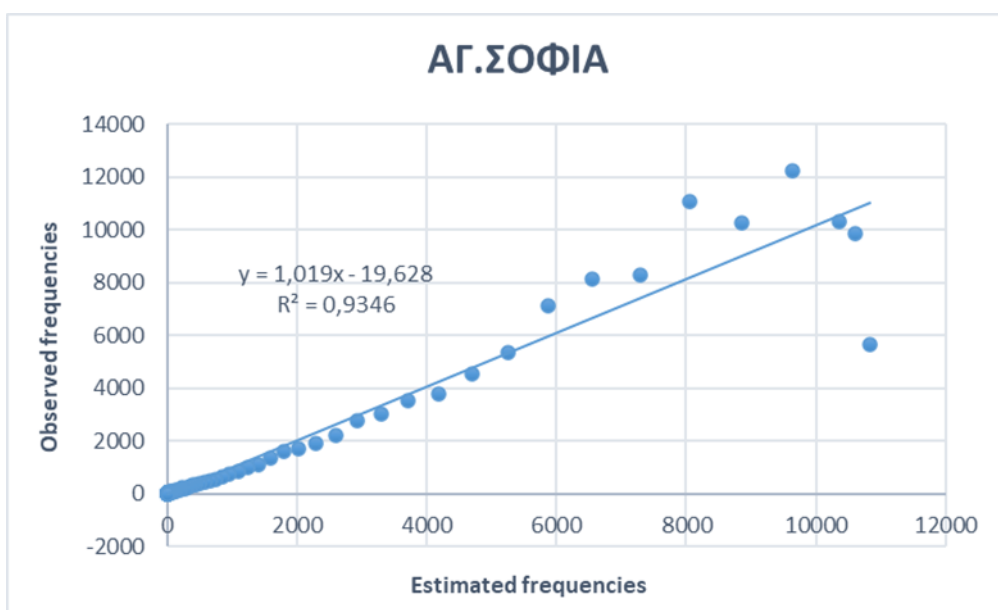
▪ Σταθμός μέτρησης Αγ.Σοφία (Αστικός Κυκλοφορίας)



**Διάγραμμα 3** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO στον σταθμό αστικού κυκλοφοριακού υποβάθρου Αγίας Σοφίας, καθώς και οι θεωρητικές καμπύλες της κανονικής και της κατανομής Gamma. Παρατηρείται ότι η κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO στον σταθμό Αγίας Σοφίας παρουσιάζει έντονη θετική ασυμμετρία, καθώς η πλειονότητα των μετρήσεων συγκεντρώνεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ η συχνότητα εμφάνισης μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνονται οι συγκεντρώσεις. Η μέγιστη συχνότητα παρατηρείται για συγκεντρώσεις μικρότερες του  $1 \text{ mg/m}^3$ , όπου καταγράφονται περισσότερες από 12.000 εμφανίσεις, ενώ στη συνέχεια η συχνότητα μειώνεται απότομα και η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως τα  $18,3 \text{ mg/m}^3$ .

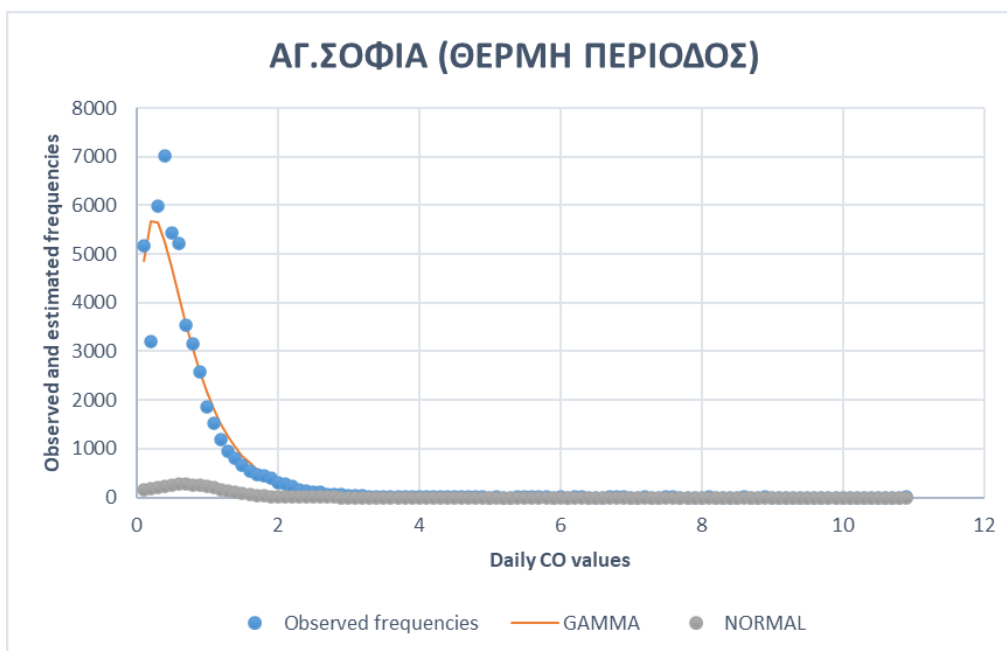
Η μορφή των συγκεντρώσεων CO είναι χαρακτηριστική των πρωτογενών ατμοσφαιρικών ρύπων, των οποίων οι συγκεντρώσεις καθορίζονται κυρίως από την ένταση των τοπικών πηγών εκπομπής, όπως η οδική κυκλοφορία, καθώς και από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν τη διασπορά των ρύπων. Κατά συνέπεια, οι περισσότερες παρατηρήσεις αντιστοιχούν σε χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ οι υψηλές τιμές εμφανίζονται περιστασιακά και συνδέονται είτε με επεισόδια αυξημένων εκπομπών είτε με συνθήκες περιορισμένης διασποράς.



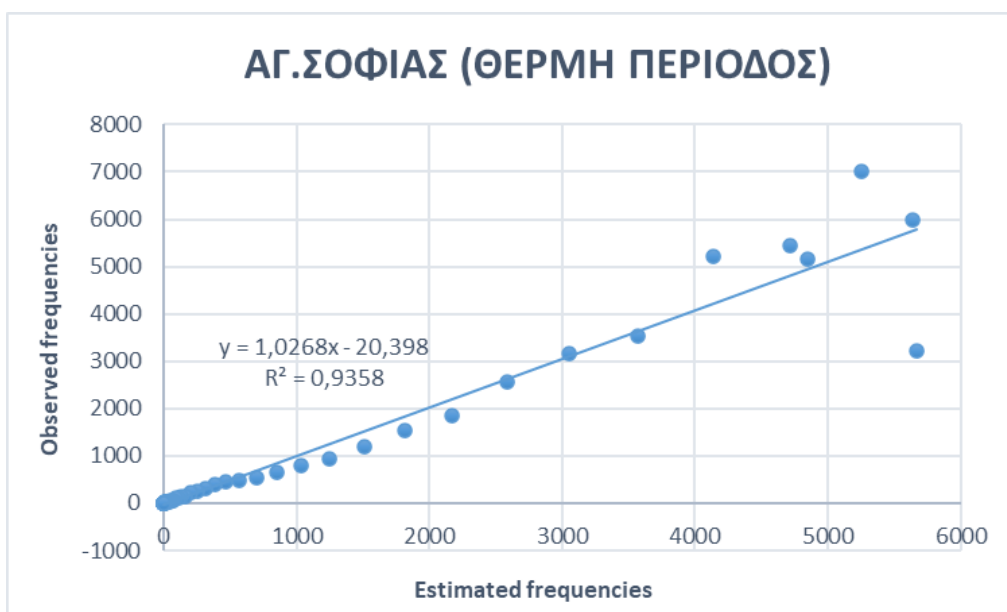
**Διάγραμμα 4** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 3 η κατανομή Gamma ακολουθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μορφή των παρατηρούμενων συχνοτήτων τόσο στην κορυφή όσο και τη δεξιά ουρά της κατανομής, σε αντίθεση με την κανονική κατανομή, η οποία παρουσιάζει εμφανείς αποκλίσεις, κυρίως στις χαμηλές συγκεντρώσεις. Η καλύτερη προσαρμογή της Gamma επιβεβαιώνεται και από τον δείκτη προσαρμογής  $R^2$ , ο οποίος λαμβάνει τιμή  $R^2=0,93$  για την κατανομή Gamma, ενώ στην κανονική κατανομή εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερη τιμή  $R^2=0,74$  (Πίνακας 4).

Η καλή προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται και από το Διάγραμμα 4, στο οποίο απεικονίζεται η σχέση μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων. Τα περισσότερα σημεία βρίσκονται κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης, γεγονός που καταδεικνύει την υψηλή ακρίβεια με την οποία η κατανομή Gamma περιγράφει την κατανομή των συγκεντρώσεων CO. Οι μικρές αποκλίσεις που εμφανίζονται στις υψηλές συγκεντρώσεις είναι αναμενόμενες και σχετίζονται με την εμφάνιση επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη μεταβλητότητα και δυσκολότερη στατιστική αναπαράσταση.



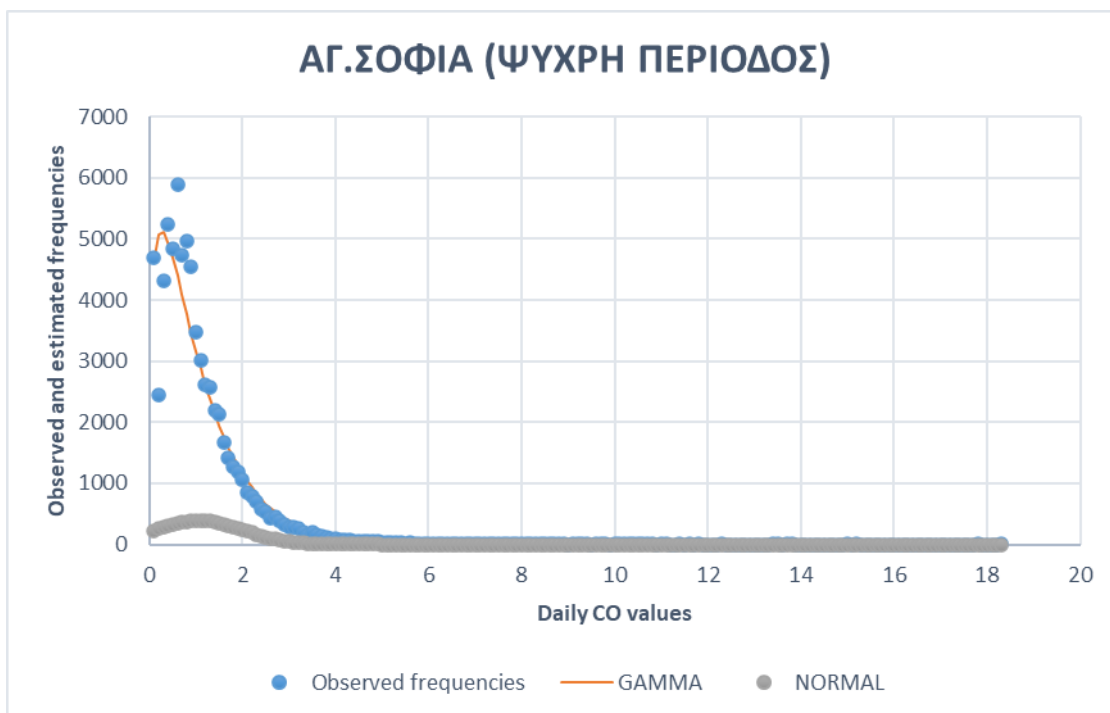
**Διάγραμμα 5** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ημερήσιων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)



**Διάγραμμα 6** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ημερήσιων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)

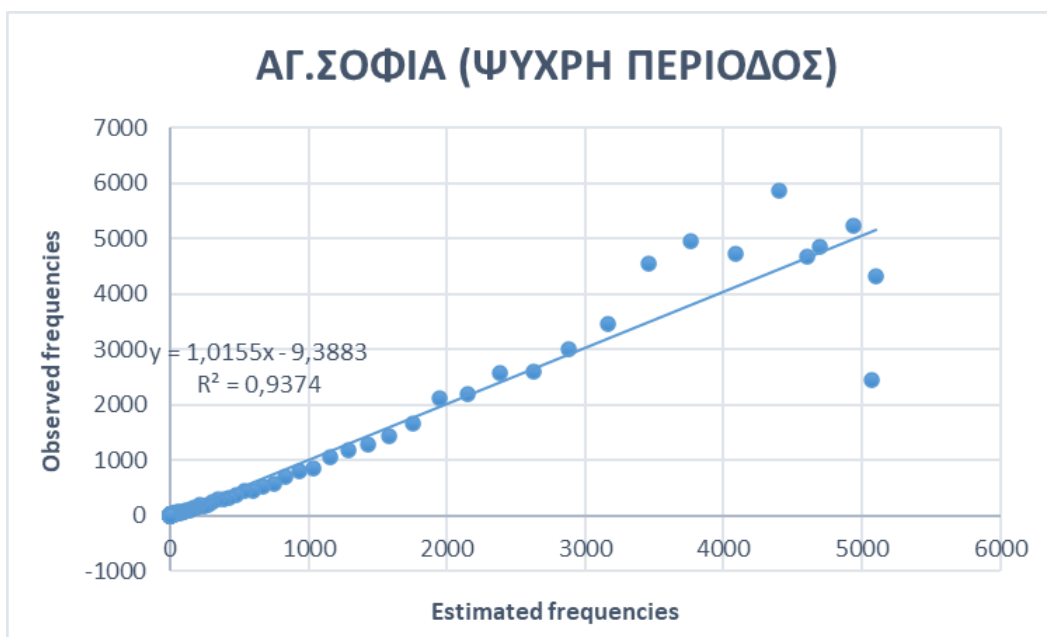
Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 5) οι περισσότερες συγκεντρώσεις CO παραμένουν επίσης κάτω από την τιμή  $1 \text{ mg/m}^3$ , ενώ η μέγιστη συχνότητα κυμαίνεται περίπου στις 7.000 εμφανίσεις. Η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως τα  $10,9 \text{ mg/m}^3$ , παρουσιάζοντας μικρότερη διασπορά σε σχέση με το σύνολο των δεδομένων. Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται σχεδόν πλήρως στις παρατηρούμενες συχνότητες, ενώ η κανονική κατανομή εξακολουθεί να εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις. Η υψηλή τιμή του

συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2=0,94$ ) και η σημαντικά χαμηλότερη τιμή του δείκτη  $\chi^2$  (Πίνακας 4) σε σχέση με την κανονική κατανομή ( $R^2=0,76$ ) επιβεβαιώνουν ότι η Gamma αποτελεί το καταλληλότερο μοντέλο για την περιγραφή των δεδομένων. Η συνολική εικόνα του σταθμού Αγ.Σοφία κατά την θερμή περίοδο σχετίζεται με τις ευνοϊκότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς κατά τους θερινούς μήνες, οι οποίες περιορίζουν τη συσσώρευση του μονοξειδίου του άνθρακα.



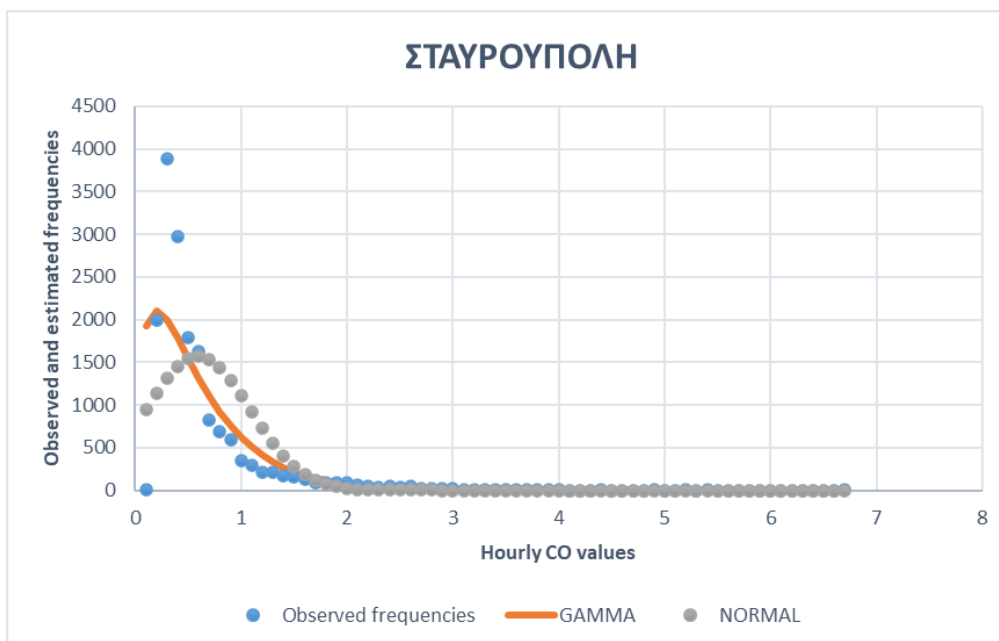
**Διάγραμμα 7** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Κατά την ψυχρή περίοδο (Διάγραμμα 7), οι ωριαίες συγκεντρώσεις CO παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε σύγκριση με τη θερμή περίοδο. Η μέγιστη συχνότητα εξακολουθεί να καταγράφεται για συγκεντρώσεις μικρότερες του  $1 \text{ mg/m}^3$ , ωστόσο η δεξιά ουρά της κατανομής είναι περισσότερο εκτεταμένη, φθάνοντας έως περίπου τα  $18,3 \text{ mg/m}^3$ . Η εικόνα αυτή υποδηλώνει συχνότερη εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεων CO κατά τους ψυχρούς μήνες. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται αφενός στις αυξημένες εκπομπές από την οδική κυκλοφορία, λόγω του κυκλοφοριακού χαρακτήρα του σταθμού, και αφετέρου στις δυσμενέστερες μετεωρολογικές συνθήκες της περιόδου, όπως η μειωμένη ατμοσφαιρική ανάμειξη και η συχνότερη εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών, οι οποίες περιορίζουν τη διασπορά των ρύπων και ευνοούν τη συσσώρευσή τους κοντά στην επιφάνεια. Παρά τη μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων, η κατανομή Gamma εξακολουθεί να προσαρμόζεται με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια στα παρατηρούμενα δεδομένα, παρουσιάζοντας συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,94$ . Αντίθετα, η κανονική κατανομή εμφανίζει αισθητά χαμηλότερη τιμή ( $R^2=0,76$ ), γεγονός που επιβεβαιώνει ότι αδυνατεί να αποδώσει ικανοποιητικά την έντονη ασυμμετρία και τη μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων κατά την ψυχρή περίοδο.

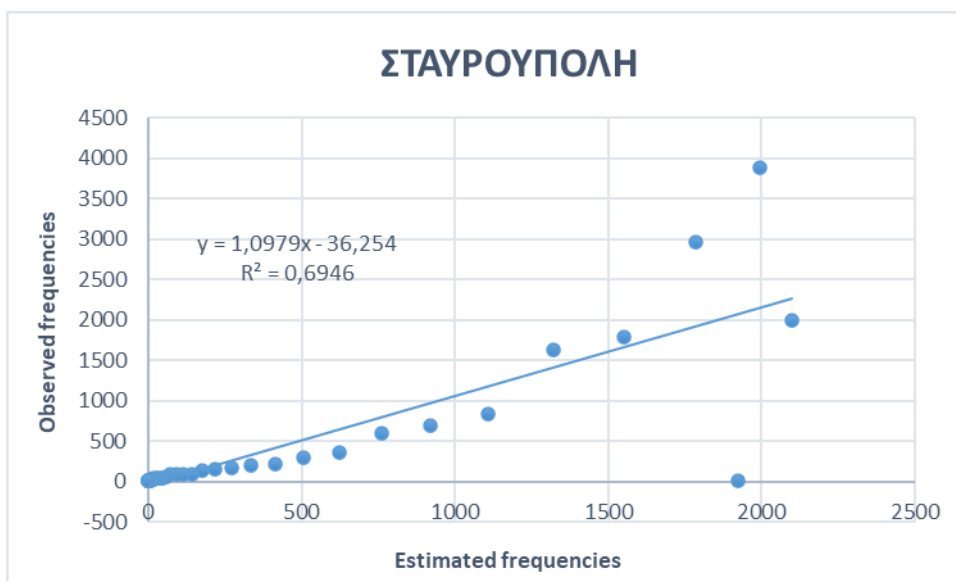


Διάγραμμα 8 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)

- Σταθμός μέτρησης Σταυρούπολη (Αστικός Κυκλοφορίας)



Διάγραμμα 9 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σταυρούπολη)

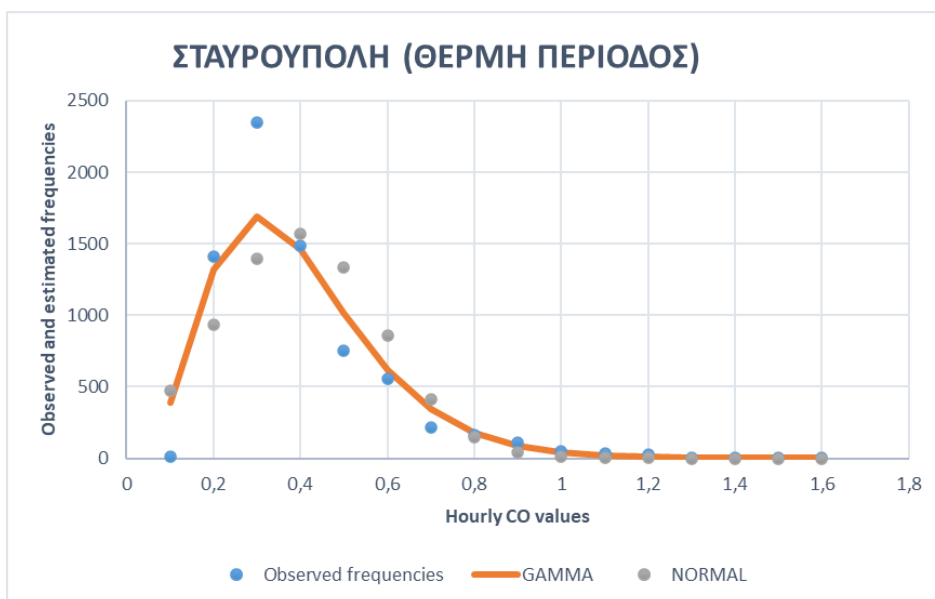


**Διάγραμμα 10** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Αταυρούπολη)

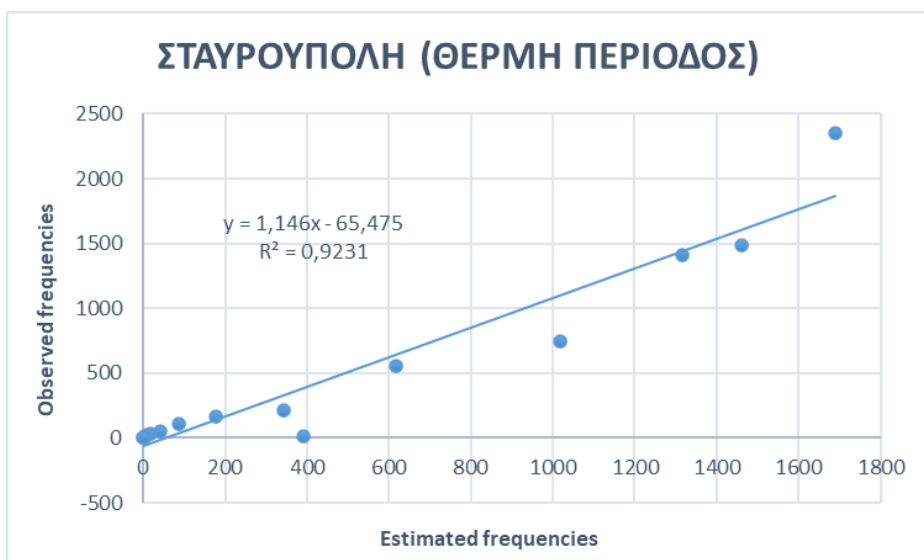
Η κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO στον σταθμό Σταυρούπολης παρουσιάζει θετική ασυμμετρία, με τις περισσότερες τιμές να συγκεντρώνονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις μεταξύ των τιμών 0,2 και 0,6 mg/m<sup>3</sup>, όπου παρατηρείται και η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης, η οποία προσεγγίζει τις 4.000 παρατηρήσεις, ενώ σταδιακά μειώνεται και η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως περίπου τα 7 mg/m<sup>3</sup> (Διάγραμμα 9).

Η κατανομή Gamma προσεγγίζει καλύτερα τις παρατηρούμενες συχνότητες σε σχέση με την κανονική κατανομή, ωστόσο η προσαρμογή της είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτήν που παρατηρήθηκε στον σταθμό Αγίας Σοφίας. Αυτό επιβεβαιώνεται από τον συντελεστή προσδιορισμού, που λαμβάνει τιμή  $R^2=0,69$  για την Gamma έναντι 0,54 για την κανονική κατανομή. Οι σχετικά χαμηλότερες τιμές των συντελεστών σε σχέση με τον σταθμό Αγ.Σοφία υποδηλώνουν ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων στον σταθμό Σταυρούπολης παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και δεν περιγράφεται με την ίδια ακρίβεια από τις εξεταζόμενες θεωρητικές κατανομές. Η μεταβλητότητα πιθανόν οφείλεται σε τοπικούς παράγοντες όπως ηπιότερη επίδραση της κυκλοφορίας ή ευνοϊκότερες συνθήκες αερισμού στην περιοχή του σταθμού, οι οποίες περιορίζουν τη συχνότητα εμφάνισης υψηλών συγκεντρώσεων CO.

Παράλληλα, το διάγραμμα συσχέτισης (Διάγραμμα 10) εμφανίζει μεγαλύτερη διασπορά των σημείων γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης, επιβεβαιώνοντας την μικρότερη ακρίβεια προσαρμογής της θεωρητικής κατανομής.

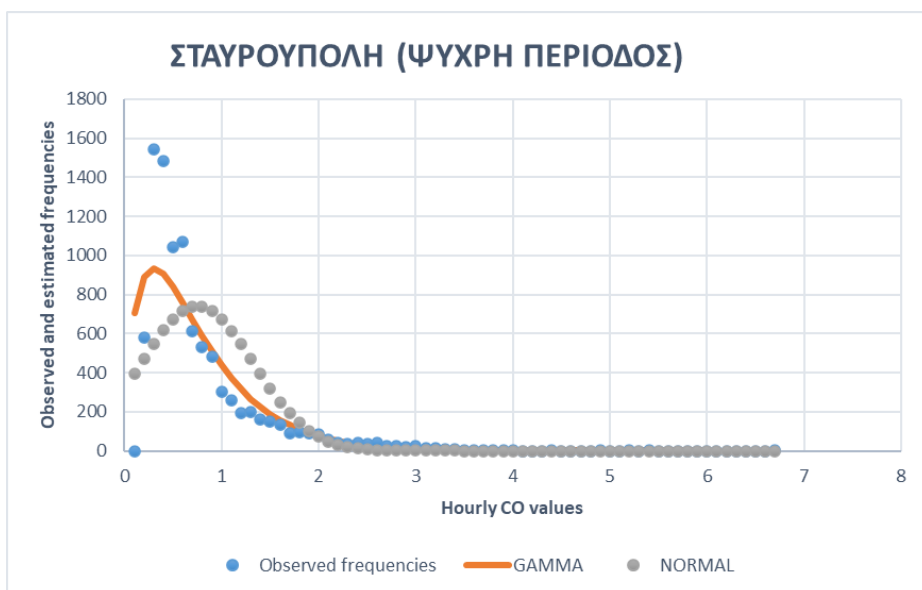


**Διάγραμμα 11** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σαυρούπολη)

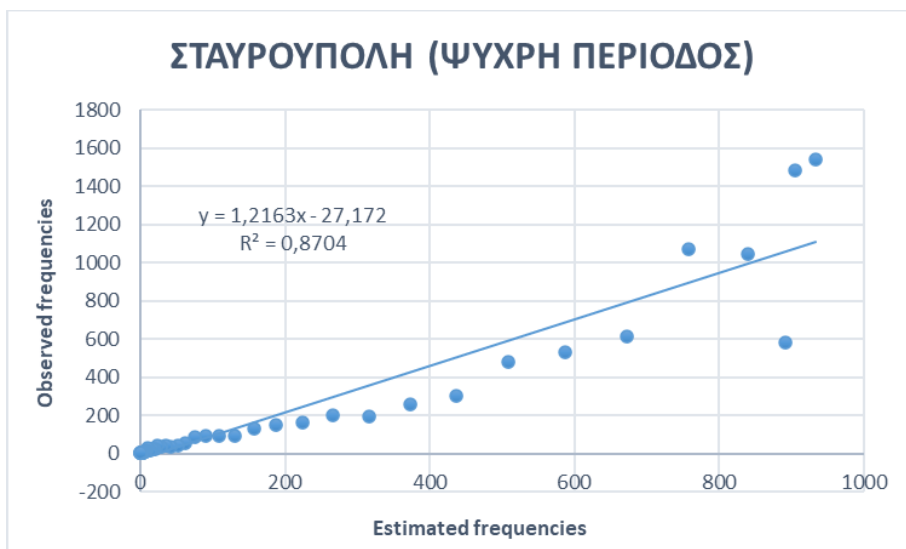


**Διάγραμμα 12** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σαυρούπολη)

Κατά τη θερμή περίοδο οι συγκεντρώσεις CO παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά και οι περισσότερες τιμές παραμένουν κάτω από περίπου  $1,2 \text{ mg/m}^3$ , με τη μέγιστη συχνότητα να εμφανίζεται στο εύρος  $0,2\text{--}0,4 \text{ mg/m}^3$ . Η κατανομή Gamma περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια τα δεδομένα, όπως αποδεικνύεται από την υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,92$ , η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη της κανονικής κατανομής  $R^2=0,76$ . Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι κατά τους θερινούς μήνες οι συγκεντρώσεις CO επηρεάζονται από πιο σταθερές συνθήκες εκπομπών και ευνοϊκότερες συνθήκες διασποράς των ρύπων.



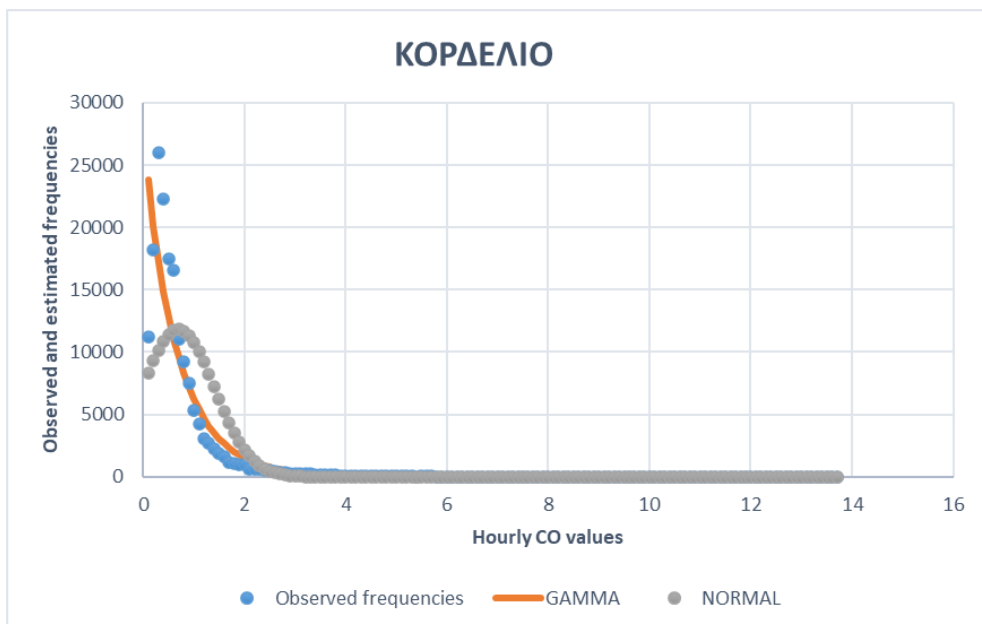
**Διάγραμμα 13 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη)**



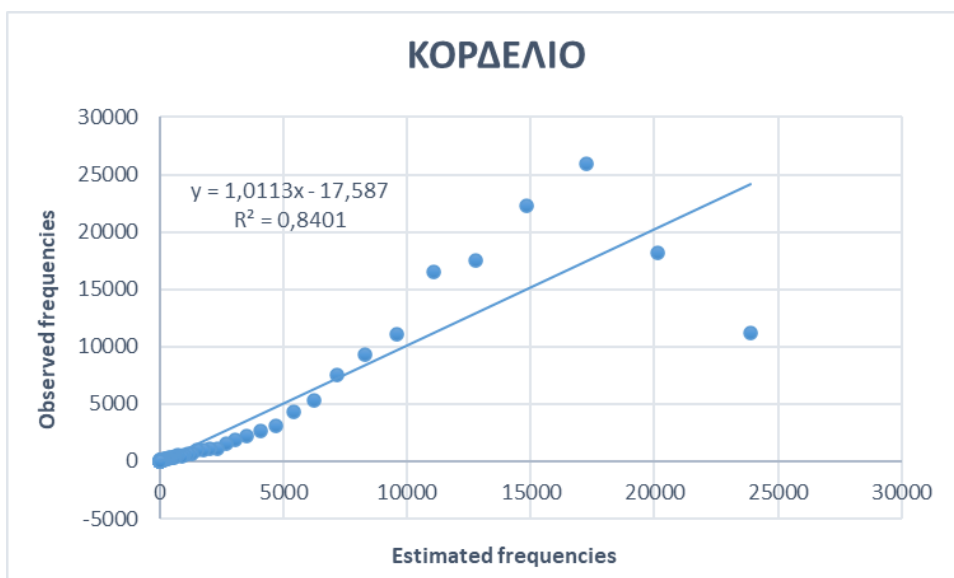
**Διάγραμμα 14 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη)**

Κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων, καθώς η δεξιά ουρά της κατανομής γίνεται εντονότερη και εμφανίζονται συχνότερα υψηλότερες συγκεντρώσεις CO. Η μέγιστη συχνότητα εξακολουθεί να εντοπίζεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, όμως η κατανομή εκτείνεται έως περίπου τα 7 mg/m<sup>3</sup>, γεγονός που αποδίδεται στην αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων και στις δυσμενέστερες μετεωρολογικές συνθήκες. Η κατανομή Gamma εξακολουθεί να παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή από την κανονική ( $R^2=0,87$  έναντι 0,58), ωστόσο η μικρότερη τιμή του  $R^2$  σε σχέση με τη θερμή περίοδο υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις CO κατά τον χειμώνα παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση.

■ Σταθμός μέτρησης Κορδελιό (Αστικός Βιομηχανικός)



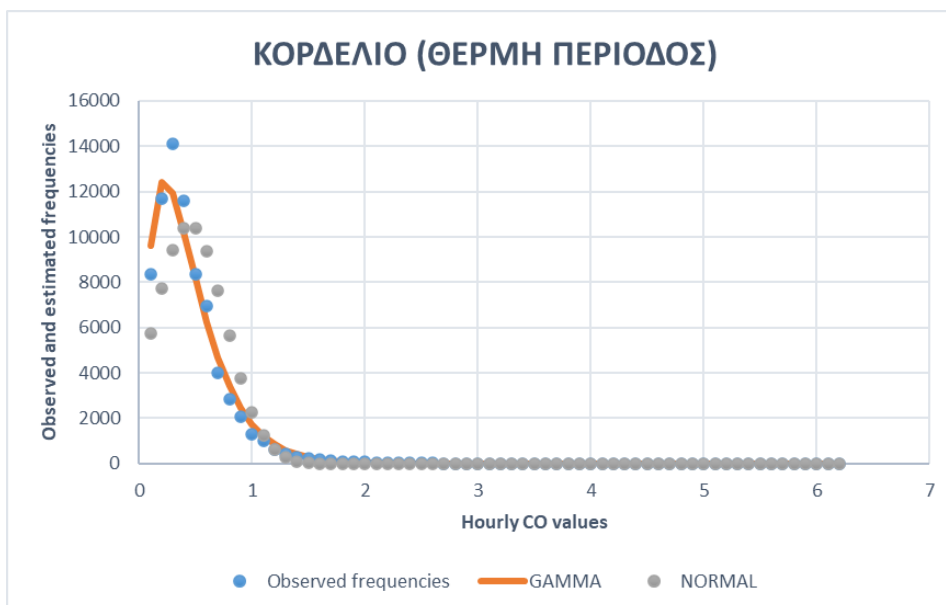
Διάγραμμα 15 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό)



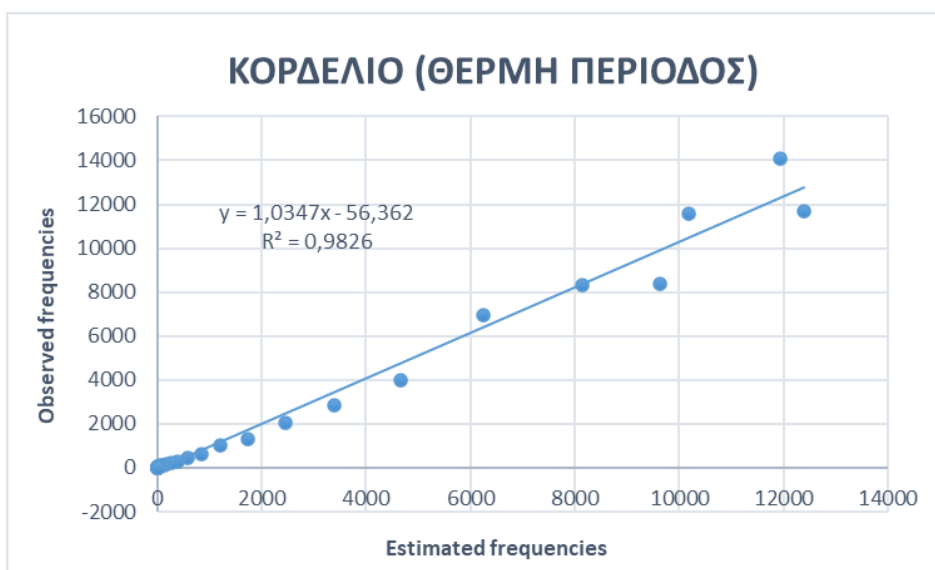
Διάγραμμα 16 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό)

Στο σταθμό Κορδελιό για το σύνολο των δεδομένων η κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO εμφανίζει θετική ασυμμετρία με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση παρατηρήσεων να εντοπίζεται στις χαμηλές συγκεντρώσεις και τη συχνότητα να μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνονται οι τιμές του CO. Η κατανομή παρουσιάζει εκτεταμένη δεξιά ουρά, γεγονός που υποδηλώνει την εμφάνιση επεισοδίων αυξημένων συγκεντρώσεων, χαρακτηριστικό που είναι αναμενόμενο για έναν αστικό-βιομηχανικό

σταθμό. Η κατανομή Gamma ακολουθεί ικανοποιητικά τη μορφή του διαγράμματος και προσαρμόζεται καλύτερα από την κανονική κατανομή (Διάγραμμα 15). Αυτό επιβεβαιώνεται και από την υψηλότερη τιμή του συντελεστή  $R^2=0,84$  έναντι 0,67 για την κανονική κατανομή. Παράλληλα, στο διάγραμμα συσχέτισης (Διάγραμμα 16) τα περισσότερα σημεία βρίσκονται κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης αποδεικνύοντας ότι η μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων είναι αυξημένη.

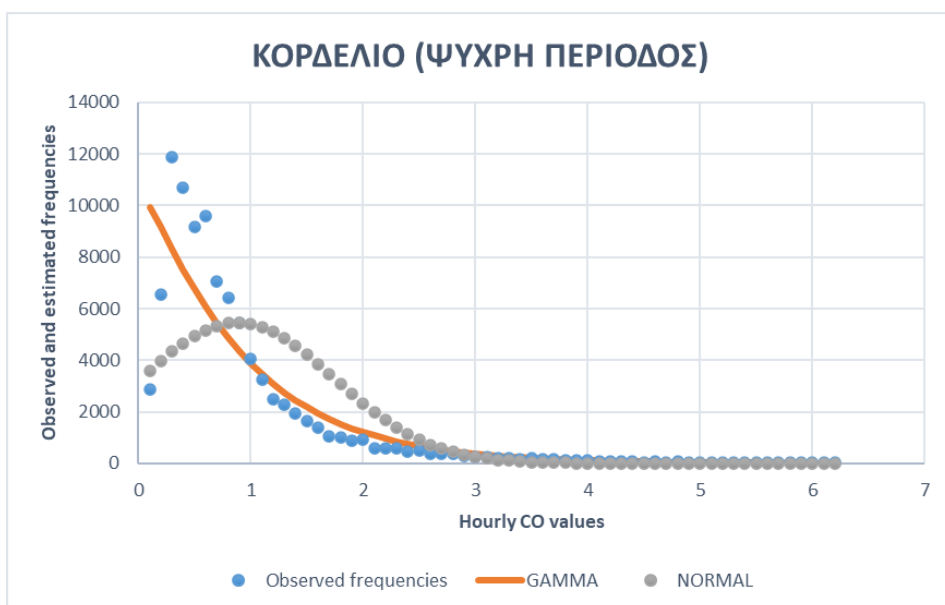


**Διάγραμμα 17** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)

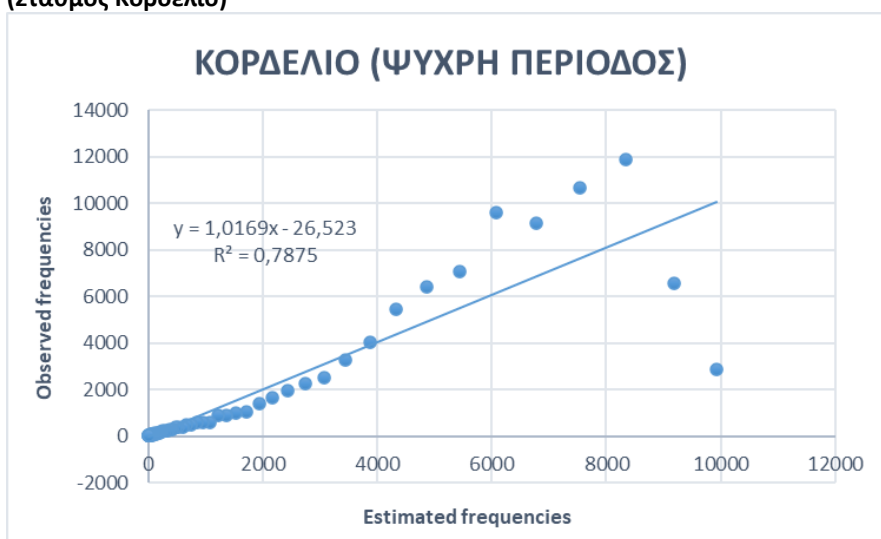


**Διάγραμμα 18** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)

Κατά τη θερμή περίοδο, στο σταθμό Κορδελιό οι περισσότερες συγκεντρώσεις εξακολουθούν να εμφανίζονται σε χαμηλές τιμές, ενώ η κατανομή παρουσιάζει μικρότερη διασπορά και λιγότερα επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων. Η προσαρμογή της κατανομής Gamma είναι εξαιρετική, καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού φθάνει το  $R^2=0,98$ , ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει χαμηλότερη τιμή  $R^2=0,86$ . Οι υψηλές τιμές  $R^2$  αποδεικνύουν καλή προσαρμογή των συγκεντρώσεων CO κατά τους θερινούς μήνες, πιθανότατα λόγω των ευνοϊκότερων συνθηκών ατμοσφαιρικής διασποράς και της μειωμένης συσσώρευσης των ρύπων.



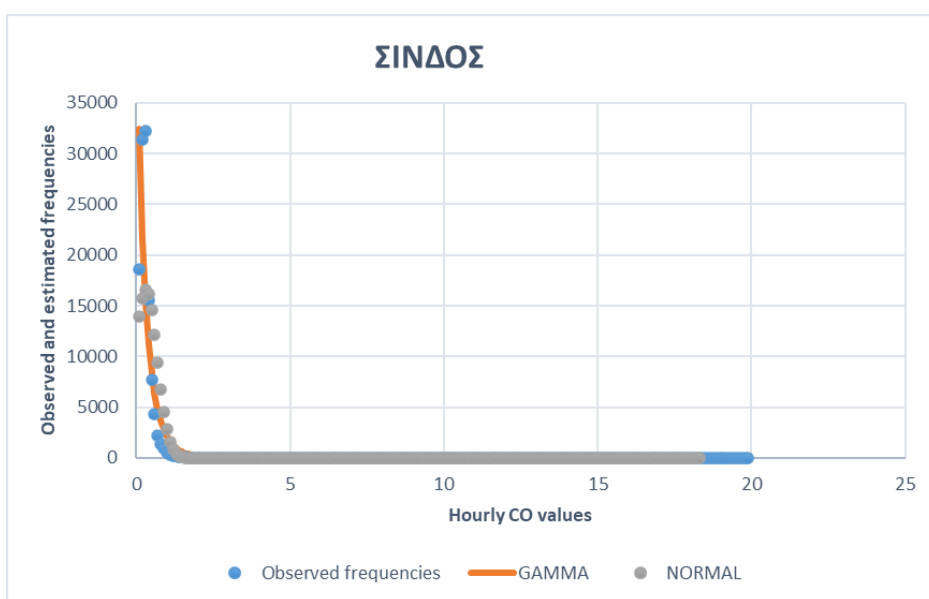
**Διάγραμμα 19** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)



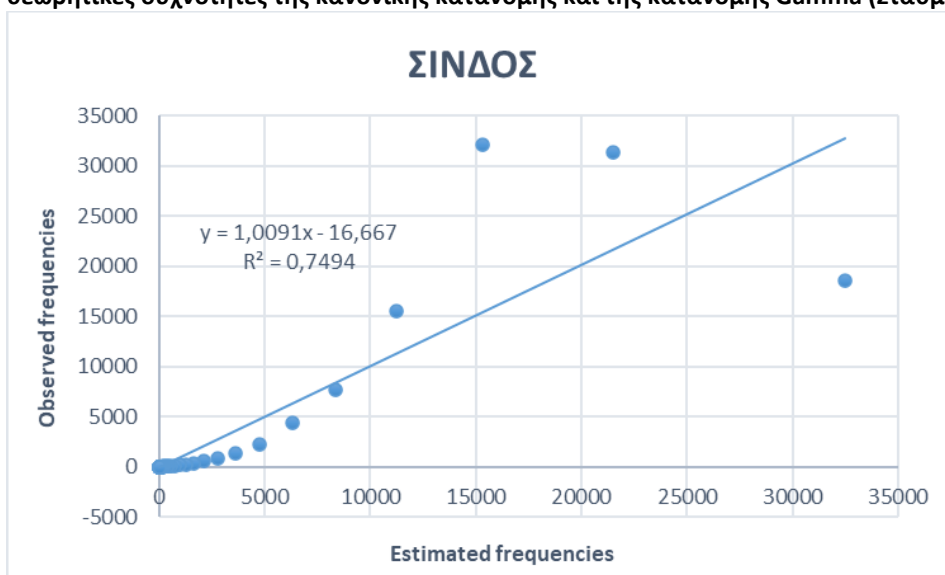
**Διάγραμμα 20** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)

Κατά την ψυχρή περίοδο η κατανομή Gamma  $R^2=0,79$  εξακολουθεί να παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή από την κανονική  $R^2=0,65$ . Η μείωση της τιμής του  $R^2$  σε σχέση με τη θερμή περίοδο υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις εμφανίζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα και είναι δυσκολότερο να περιγραφούν από μία θεωρητική κατανομή. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται με τη συνδυασμένη επίδραση της αυξημένης έντασης των εκπομπών από την κυκλοφορία και τη βιομηχανική δραστηριότητα, καθώς και των δυσμενέστερων μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν κατά την ψυχρή περίοδο και περιορίζουν τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων.

■ Σταθμός μέτρησης Σίνδος (Περιστικός Βιομηχανικός)

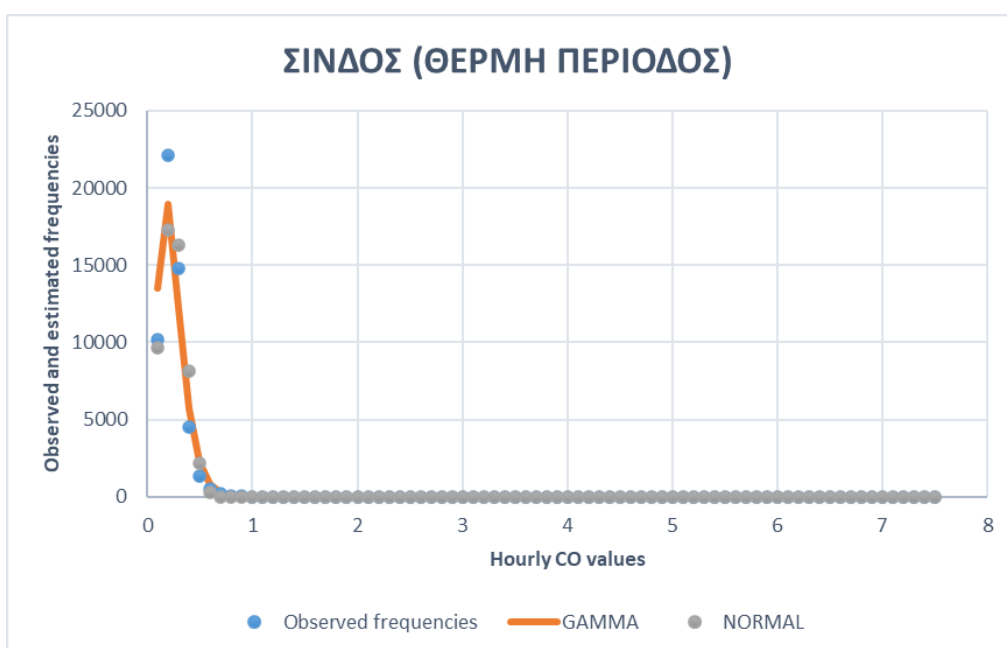


Διάγραμμα 21 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος)



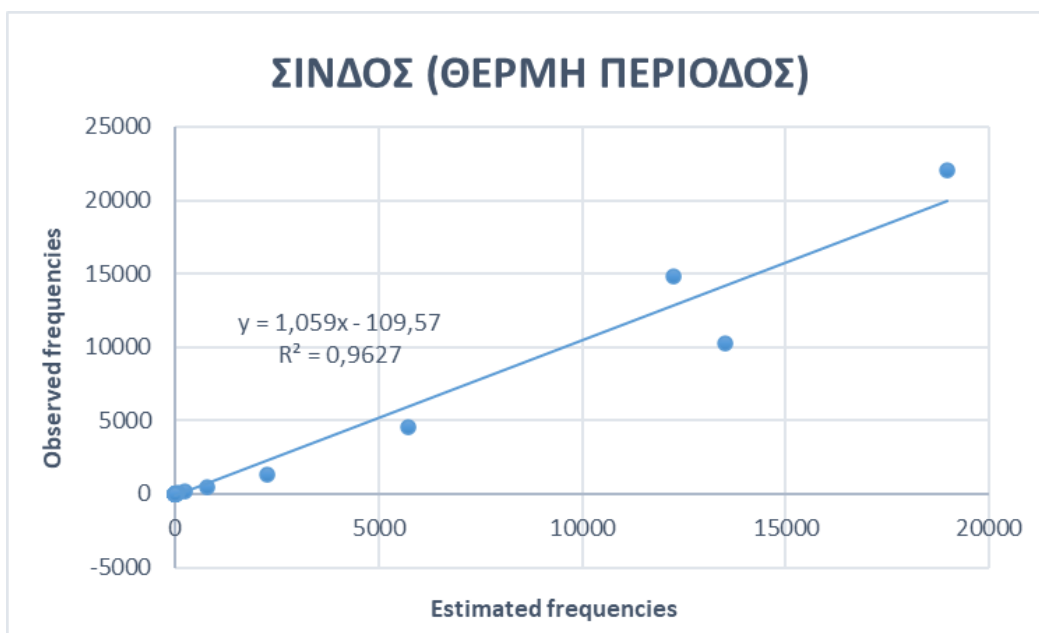
Διάγραμμα 22 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος)

Η κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO στον σταθμό Σίνδος παρουσιάζει έντονη θετική ασυμμετρία, καθώς η πλειονότητα των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, μικρότερες του  $1 \text{ mg/m}^3$ , όπου καταγράφεται και η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης, η οποία προσεγγίζει τις 30.000-32.000 εμφανίσεις. Η συχνότητα μειώνεται απότομα με την αύξηση των συγκεντρώσεων, ενώ η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως περίπου τα  $20 \text{ mg/m}^3$ . Η κατανομή Gamma ακολουθεί ικανοποιητικά τη μορφή του διαγράμματος και περιγράφει καλύτερα την κατανομή των δεδομένων σε σχέση με την κανονική κατανομή. Η υπεροχή αυτή επιβεβαιώνεται από τον συντελεστή προσδιορισμού, καθώς η Gamma παρουσιάζει  $R^2=0,75$ , ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει χαμηλότερη τιμή  $R^2=0,73$ .

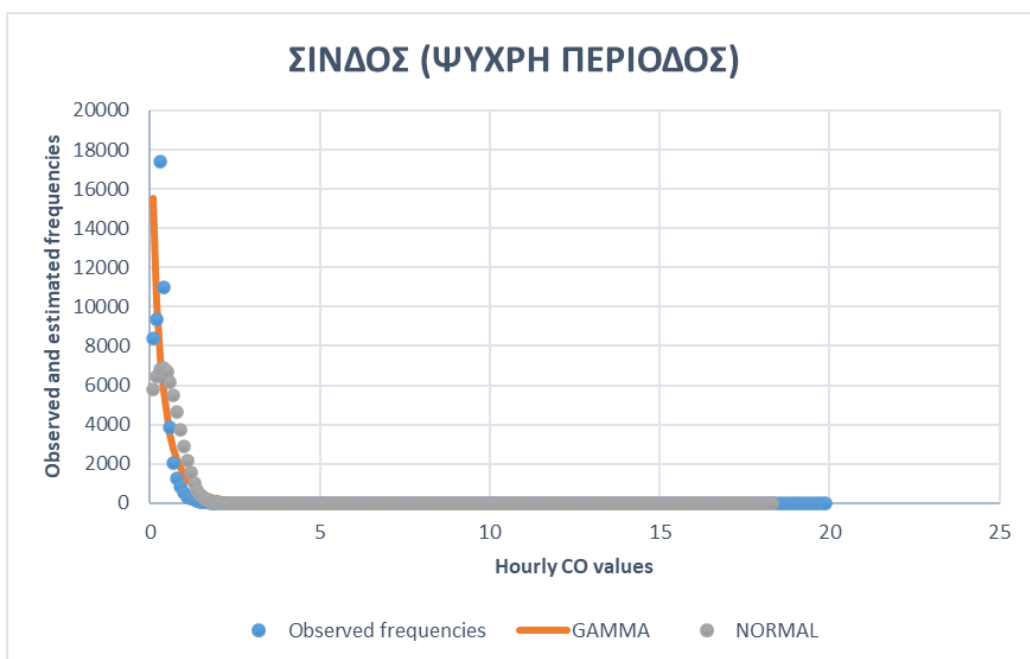


**Διάγραμμα 23 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)**

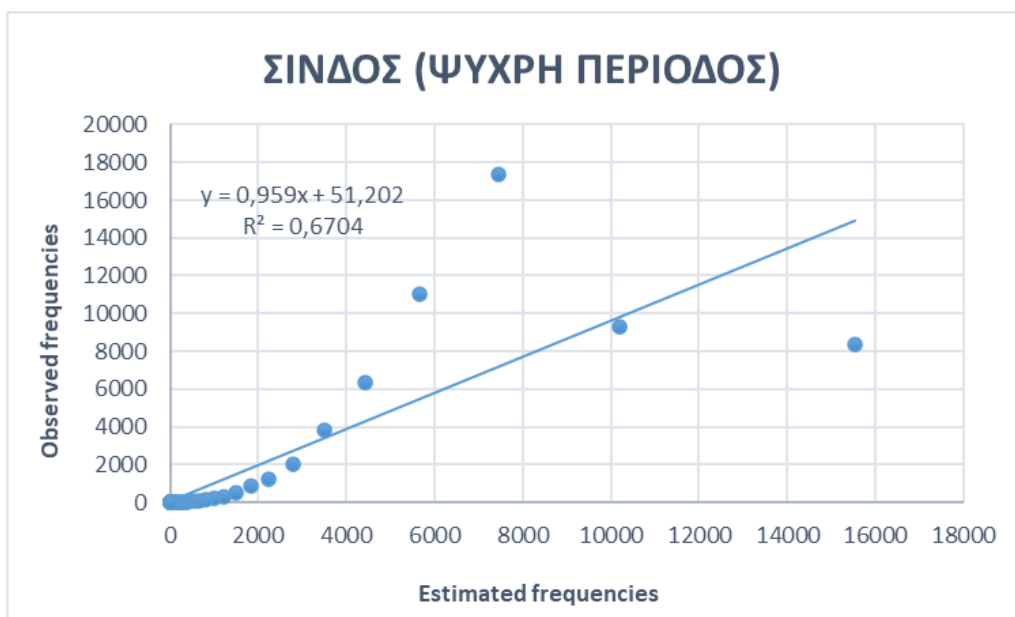
Σύμφωνα με το διάγραμμα 23 κατά τη θερμή περίοδο η πλειονότητα των συγκεντρώσεων εξακολουθεί να βρίσκεται κάτω από το  $1 \text{ mg/m}^3$ , ενώ η μέγιστη συχνότητα ανέρχεται περίπου στις 22.000 εμφανίσεις. Η δεξιά ουρά της κατανομής είναι αισθητά μικρότερη και εκτείνεται έως περίπου τα  $7 \text{ mg/m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει περιορισμένη εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων. Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται σχεδόν ιδανικά στα δεδομένα κατά την θερμή περίοδο, όπως επιβεβαιώνεται από τον πολύ υψηλό συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,96$ , ο οποίος είναι σημαντικά υψηλότερος από εκείνον της κανονικής κατανομής  $R^2=0,90$ . Η εξαιρετική αυτή προσαρμογή δείχνει ότι κατά τους θερινούς μήνες οι συγκεντρώσεις CO παρουσιάζουν πιο ομοιογενή στατιστική συμπεριφορά, γεγονός που σχετίζεται με τις ευνοϊκότερες συνθήκες διασποράς των ρύπων και τη μειωμένη συσσώρευση στην ατμόσφαιρα.



**Διάγραμμα 24** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)



**Διάγραμμα 25** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)

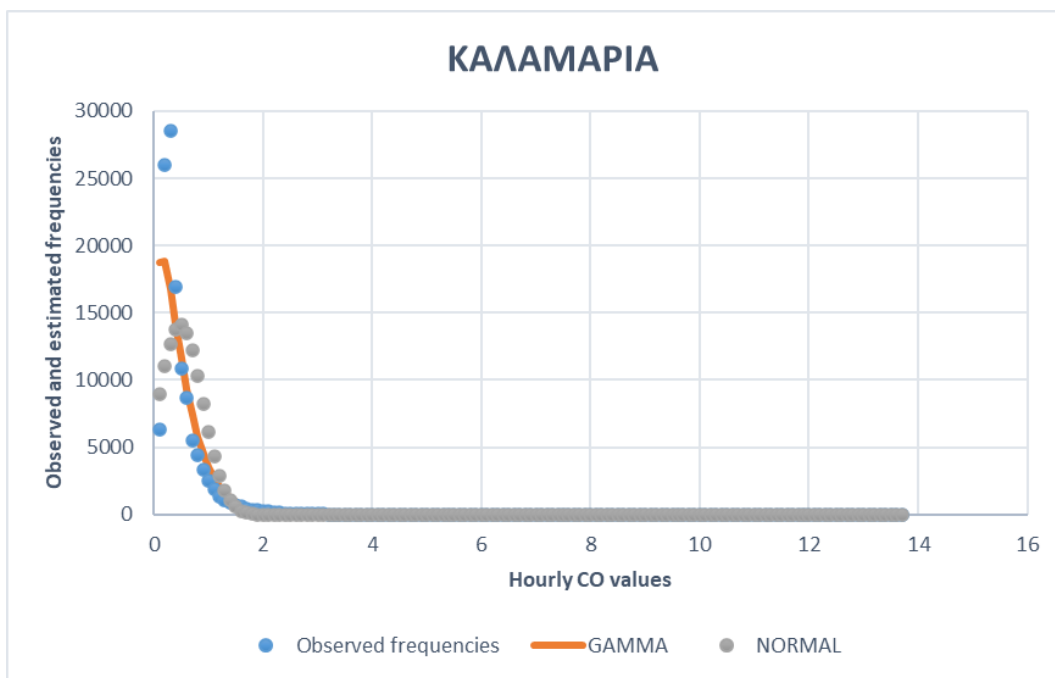


**Διάγραμμα 26** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)

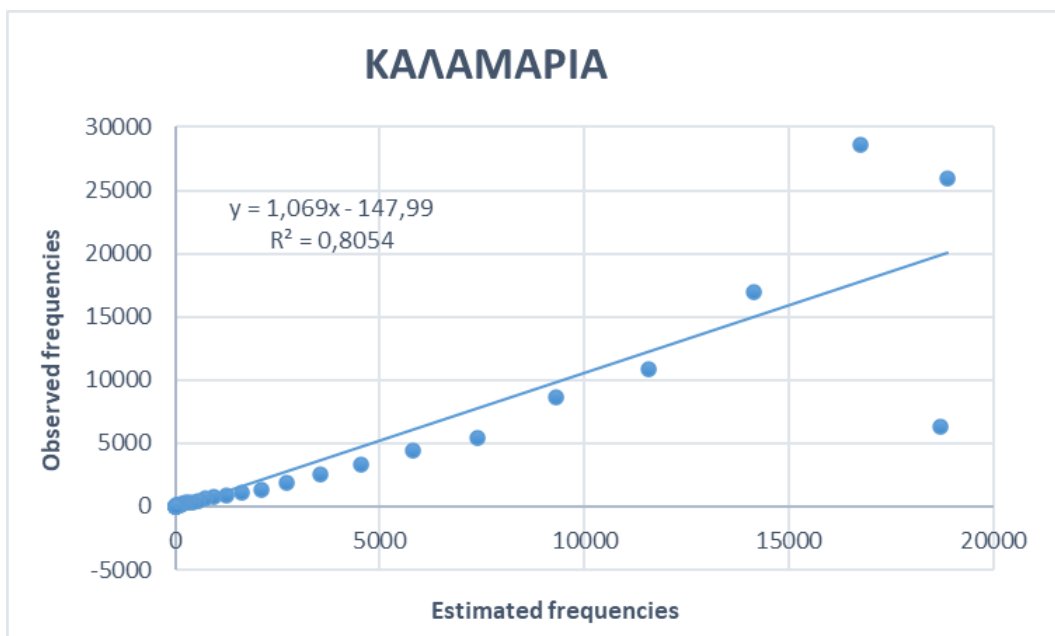
Κατά την ψυχρή περίοδο, η εικόνα μεταβάλλεται αισθητά. Η μέγιστη συχνότητα παραμένει στις χαμηλές συγκεντρώσεις, όμως η δεξιά ουρά της κατανομής γίνεται εντονότερη και εκτείνεται έως περίπου τα 20mg/m<sup>3</sup>. Η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη συνδυασμένη επίδραση της βιομηχανικής δραστηριότητας της περιοχής, της κυκλοφορίας των οχημάτων, των εκπομπών από τη θέρμανση και των δυσμενέστερων μετεωρολογικών συνθηκών που ευνοούν τη συσσώρευση των ρύπων. Παρότι η κατανομή Gamma εξακολουθεί να παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή από την κανονική με τιμή  $R^2=0,67$  έναντι 0,62, η αισθητή μείωση του συντελεστή προσδιορισμού σε σχέση με τη θερμή περίοδο δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη διακύμανση και επηρεάζονται από περισσότερους παράγοντες. Η μεγαλύτερη διασπορά των σημείων στο διάγραμμα συσχέτισης (Διάγραμμα 26) επιβεβαιώνει ότι η προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής είναι δυσκολότερη κατά τους χειμερινούς μήνες.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατανομή Gamma περιγράφει καλύτερα τις συγκεντρώσεις CO στον σταθμό Σίνδος σε σχέση με την κανονική κατανομή, με την καλύτερη προσαρμογή να παρατηρείται κατά τη θερμή περίοδο. Αντίθετα, η χαμηλότερη τιμή του  $R^2$  κατά την ψυχρή περίοδο αντανάκλα τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων σε έναν περιστατικό-βιομηχανικό σταθμό, όπου οι συγκεντρώσεις διαμορφώνονται από την αλληλεπίδραση πολλαπλών πηγών εκπομπών και των επικρατουσών μετεωρολογικών συνθηκών.

- Σταθμός μέτρησης Καλαμαριά (Αστικός Υποβάθρου)



Διάγραμμα 27 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά)



Διάγραμμα 28 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά)

Η κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO στον σταθμό Καλαμαριά παρουσιάζει έντονη θετική ασυμμετρία, καθώς η πλειονότητα των εμφανίσεων συγκεντρώνεται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις κάτω από  $1 \text{ mg/m}^3$ . Η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης προσεγγίζει τις 18.000-20.000 εμφανίσεις, ενώ η συχνότητα μειώνεται απότομα με την αύξηση των συγκεντρώσεων (Διάγραμμα 27). Η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως περίπου τα  $14 \text{ mg/m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει ότι, αν και οι υψηλές συγκεντρώσεις εμφανίζονται σχετικά σπάνια, καταγράφονται περιστασιακά επεισόδια αυξημένων τιμών CO.

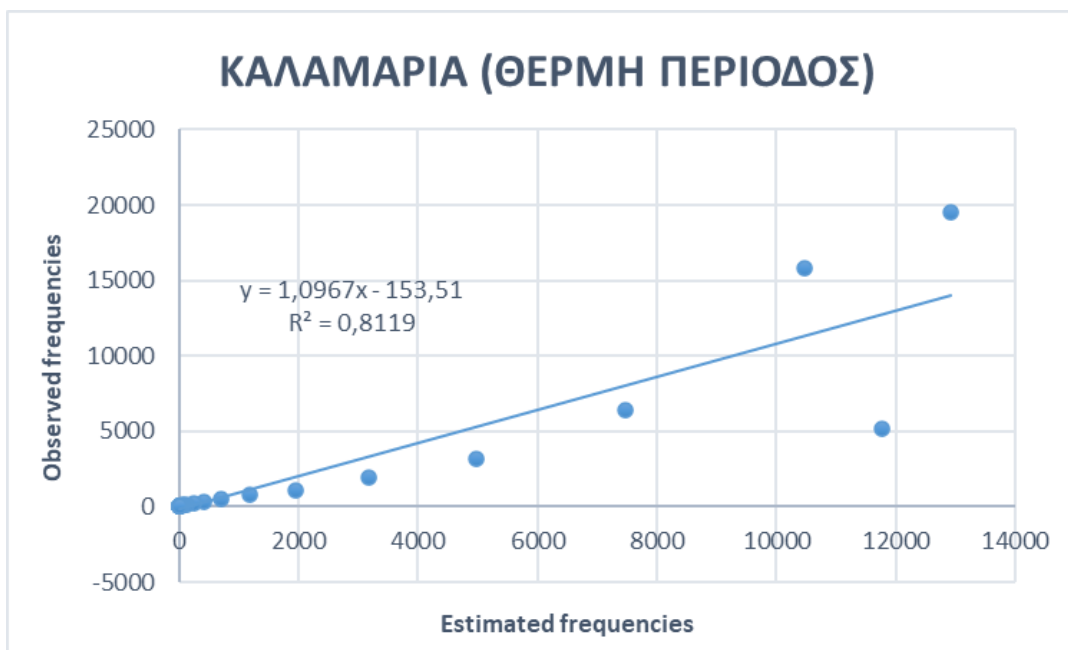
Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται ικανοποιητικότερα στην κατανομή των δεδομένων σε σχέση με την κανονική κατανομή, ιδιαίτερα στις χαμηλές συγκεντρώσεις και στη δεξιά ουρά (Διάγραμμα 27). Αυτό επιβεβαιώνεται από την υψηλότερη τιμή του συντελεστή  $R^2=0,81$  έναντι της τιμής  $R^2=0,64$  της κανονικής κατανομής. Ωστόσο, η τιμή του  $R^2$  είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με σταθμούς όπως η Αγία Σοφία ή το Κορδελιό αποδεικνύοντας τη μεγαλύτερη διασπορά των δεδομένων και μικρότερη ακρίβεια προσαρμογής της θεωρητικής κατανομής.



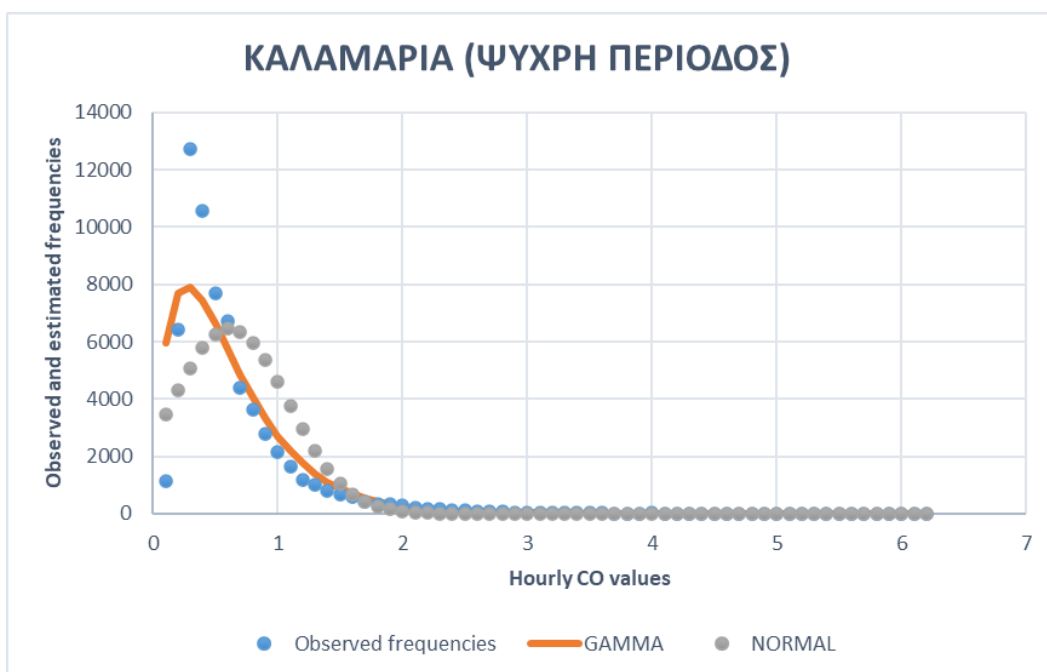
**Διάγραμμα 29 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)**

Κατά τη θερμή περίοδο η πλειονότητα των συγκεντρώσεων παραμένει μικρότερη του  $1 \text{ mg/m}^3$ , ενώ η μέγιστη συχνότητα ανέρχεται περίπου στις 12.000-13.000 εμφανίσεις. Η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως περίπου τα  $14 \text{ mg/m}^3$ . Η κατανομή Gamma εξακολουθεί να περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα από την κανονική κατανομή, παρουσιάζοντας  $R^2=0,81$ , έναντι 0,72 της κανονικής. Παρά τη σαφή υπεροχή της Gamma, η σχετικά μέτρια τιμή του  $R^2$  δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις CO παρουσιάζουν μεγαλύτερη

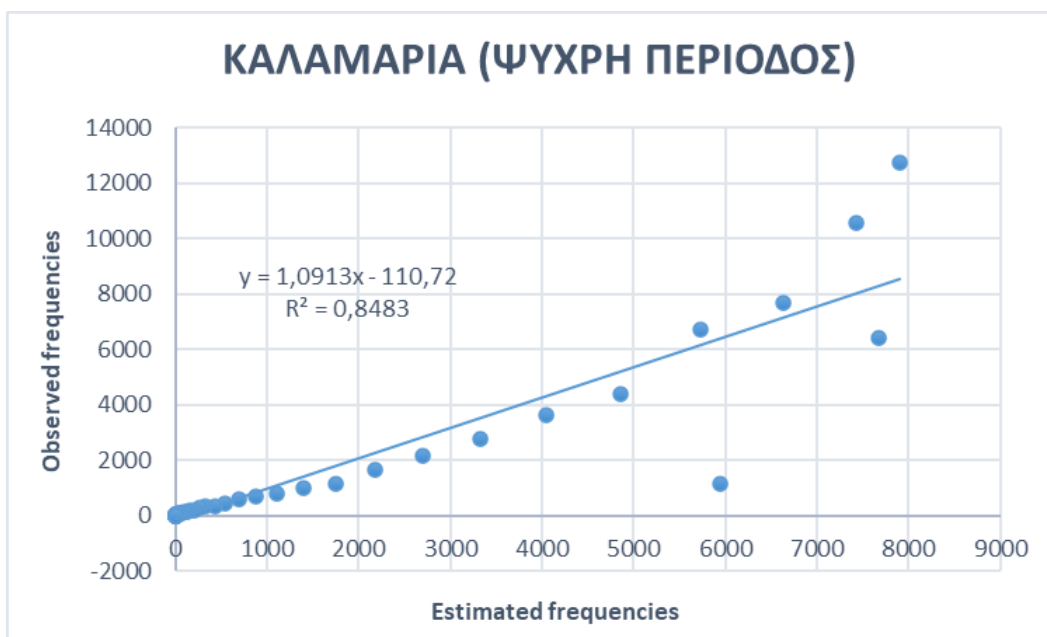
μεταβλητότητα από αυτή που παρατηρήθηκε σε άλλους σταθμούς, πιθανόν λόγω της συνδυασμένης επίδρασης του γενικού αστικού υποβάθρου και των τοπικών συνθηκών.



Διάγραμμα 30 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)



Διάγραμμα 31 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)



**Διάγραμμα 32** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)

Κατά την ψυχρή περίοδο η κατανομή διατηρεί την ίδια θετική και η δεξιά ουρά εκτείνεται περίπου στα 6–7 mg/m<sup>3</sup>. Η μέγιστη συχνότητα παρατηρείται και πάλι σε συγκεντρώσεις μικρότερες του 1 mg/m<sup>3</sup>, ενώ παρουσιάζει μικρότερη έκταση της δεξιάς ουράς σε σχέση με την θερμή περίοδο. Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα με τιμή του συντελεστή  $R^2=0,85$  έναντι της τιμής  $R^2=0,68$  της κανονικής κατανομής.

Παράλληλα, το διάγραμμα συσχέτισης (Διάγραμμα 32) δείχνει ότι τα σημεία εξακολουθούν να παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη διασπορά γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης, που σημαίνει ότι συγκεντρώσεις χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη μεταβλητότητα.

Ένα ενδιαφέρον εύρημα που προκύπτει από την εποχική ανάλυση του σταθμού Καλαμαριάς είναι ότι οι συγκεντρώσεις CO εμφανίζονται ελαφρώς υψηλότερες κατά τη θερμή περίοδο σε σχέση με την ψυχρή και διαφοροποιούνται από τη συνήθη εποχική συμπεριφορά που παρατηρείται στους περισσότερους σταθμούς. Η διαφοροποίηση αυτή ενδέχεται να συνδέεται με τον χαρακτήρα του σταθμού ως αστικού υποβάθρου. Το επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης της ευρύτερης περιοχής ενδέχεται να επηρεάζεται περισσότερο από την περιφερειακή μεταφορά αέριων μαζών παρά από μία κυρίαρχη τοπική πηγή εκπομπών. Επιπλέον, κατά τους θερινούς μήνες είναι πιθανό να ενισχύεται η επίδραση παραγόντων, όπως η αυξημένη κυκλοφορία στην παραλιακή ζώνη της Καλαμαριάς, η εντονότερη θαλάσσια δραστηριότητα στον Θερμαϊκό Κόλπο και οι τοπικές κυκλοφορίες που αναπτύσσονται λόγω της θαλάσσιας αύρας, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη μεταφορά και τη διασπορά των αέριων ρύπων.

### **3.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της κατανομής Gamma και της Κανονικής κατανομής στα ωριαία δεδομένα CO της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2001-2024**

Η εφαρμογή της κατανομής Gamma και της κανονικής κατανομής στις ωριαίες συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα CO για τη χρονική περίοδο 2001-2024 κατέδειξε ότι η κατανομή Gamma αποτελεί την καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των συγκεντρώσεων σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης. Το συμπέρασμα αυτό τεκμηριώνεται τόσο από την οπτική σύγκριση των θεωρητικών και παρατηρούμενων συχνοτήτων στα διαγράμματα όσο και από τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και τις χαμηλότερες τιμές του δείκτη  $\chi^2$  που παρουσίασε η Gamma σε σύγκριση με την κανονική κατανομή. Αντίθετα, η κανονική κατανομή δεν κατάφερε να περιγράψει ικανοποιητικά τη μορφή των δεδομένων, καθώς παρουσίασε σημαντικές αποκλίσεις τόσο στην κορυφή των διαγραμμάτων όσο και στη δεξιά ουρά τους, γεγονός που αποδίδεται στη συμμετρική φύση της και στην αδυναμία της να αναπαραστήσει την έντονη θετική ασυμμετρία των συγκεντρώσεων CO.

Παρότι που η κατανομή Gamma αποτελεί την καταλληλότερη κατανομή για όλους τους σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στον βαθμό προσαρμογής της, οι οποίες σχετίζονται με τον χαρακτήρα κάθε σταθμού και τις επικρατούσες πηγές εκπομπών. Στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, όπως η Αγία Σοφία και η Σταυρούπολη, οι συγκεντρώσεις CO επηρεάζονται κυρίως από τις εκπομπές της οδικής κυκλοφορίας. Ειδικότερα, ο σταθμός Αγία Σοφία παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή  $R^2$ , γεγονός που υποδηλώνει ομοιογενή στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων, ενώ στη Σταυρούπολη η ελαφρώς χαμηλότερη προσαρμογή υποδηλώνει μεγαλύτερη μεταβλητότητα, πιθανόν λόγω διαφοροποιήσεων στην ένταση της κυκλοφορίας και στις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες.

Αντίστοιχα, στους σταθμούς Κορδελιό και Σίνδος, όπου οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται τόσο από τη βιομηχανική δραστηριότητα όσο και από την οδική κυκλοφορία, παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των δεδομένων και συχνότερη εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων CO. Η παρουσία πολλαπλών πηγών εκπομπών οδηγεί σε αυξημένη διασπορά των συγκεντρώσεων και συχνότερη εμφάνιση υψηλών τιμών, γεγονός που δυσχεραίνει την πλήρη προσαρμογή οποιασδήποτε θεωρητικής κατανομής. Παρόλα αυτά, η κατανομή Gamma εξακολουθεί να περιγράφει σημαντικά καλύτερα τα δεδομένα από την κανονική κατανομή.

Ο σταθμός Καλαμαριά, ως σταθμός αστικού υποβάθρου, αποτυπώνει κυρίως το γενικό επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης της ευρύτερης περιοχής και επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από άμεσες τοπικές πηγές εκπομπών. Παρότι παρουσιάζει γενικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις CO σε σχέση με τους σταθμούς κυκλοφορίας, η στατιστική συμπεριφορά των δεδομένων παραμένει ασύμμετρη, με αποτέλεσμα η κατανομή Gamma να εξακολουθεί να παρέχει την καλύτερη προσαρμογή.

Η εποχική ανάλυση έδειξε ότι η μορφή των κατανομών διαφοροποιείται μεταξύ θερμής και ψυχρής περιόδου. Στους περισσότερους σταθμούς, κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρούνται μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων και εντονότερη δεξιά ουρά, γεγονός που αποδίδεται στις αυξημένες εκπομπές από την οδική κυκλοφορία και τη θέρμανση, καθώς και στις δυσμενέστερες συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς. Αντίθετα, κατά τη θερμή περίοδο οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται γενικά χαμηλότερες και περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από τις συνήθεις τιμές, οδηγώντας σε ακόμη καλύτερη προσαρμογή της κατανομής Gamma. Εξαίρεση αποτελεί ο σταθμός Καλαμαριάς, όπου παρατηρήθηκαν ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη θερμή περίοδο, εύρημα που πιθανόν συνδέεται με τον χαρακτήρα του σταθμού ως αστικού υποβάθρου και την επίδραση της περιφερειακής μεταφοράς αέριων μαζών και τις ιδιαίτερες μετεωρολογικές συνθήκες της παράκτιας ζώνης της Θεσσαλονίκης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η μορφή της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων CO επηρεάζεται σημαντικά τόσο από τον χαρακτήρα του κάθε σταθμού όσο και από τις επικρατούσες πηγές εκπομπών και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Παρά τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των σταθμών και της εποχικότητας, η κατανομή Gamma αποδείχθηκε σταθερά η καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των ωριαίων συγκεντρώσεων CO της Θεσσαλονίκης, καθώς αποδίδει με μεγαλύτερη αξιοπιστία την έντονη θετική ασυμμετρία, τη μεταβλητότητα και την εμφάνιση ακραίων συγκεντρώσεων που χαρακτηρίζουν έναν πρωτογενή ατμοσφαιρικό ρύπο, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα.

### **3.8 Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων PM10 κατά τη θερμή και ψυχρή περίοδο την περίοδο 2001-2024**

Για τη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης των συγκεντρώσεων PM10 στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων για τη χρονική περίοδο 2001–2024.

Η ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα από οκτώ σταθμούς μέτρησης (Αγία Σοφία, Καλαμαριά, Κορδελιό, Σίνδος, Σταυρούπολη, Νεοχωρούδα, Πανόραμα και ΠΚΜ), τα οποία διαχωρίστηκαν σε θερμή περίοδο (Μάιος–Σεπτέμβριος) και ψυχρή περίοδο (Οκτώβριος–Απρίλιος). Τα δεδομένα της περιόδου 2001–2016 αφορούν ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων, ενώ για την περίοδο 2017–2024 χρησιμοποιήθηκαν ωριαίες τιμές. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM10 για τις δύο περιόδους παρουσιάζονται στους Πίνακες.

Η διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων για τη χρονική αυτή περίοδο 2001 – 2024 παρουσιάζει πτωτική τάση των ρύπων περίπου μέχρι το έτος 2015. Από το έτος 2015 εμφανίζεται μια τάση σταθεροποίησης του ρύπου σε όλους τους σταθμούς. Σε ορισμένα χρονικά διαστήματα παρατηρούνται ελλείψεις δεδομένων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ασυνεχειών στις χρονοσειρές. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM10 για τις δύο περιόδους παρουσιάζονται στους Πίνακες .. και ...

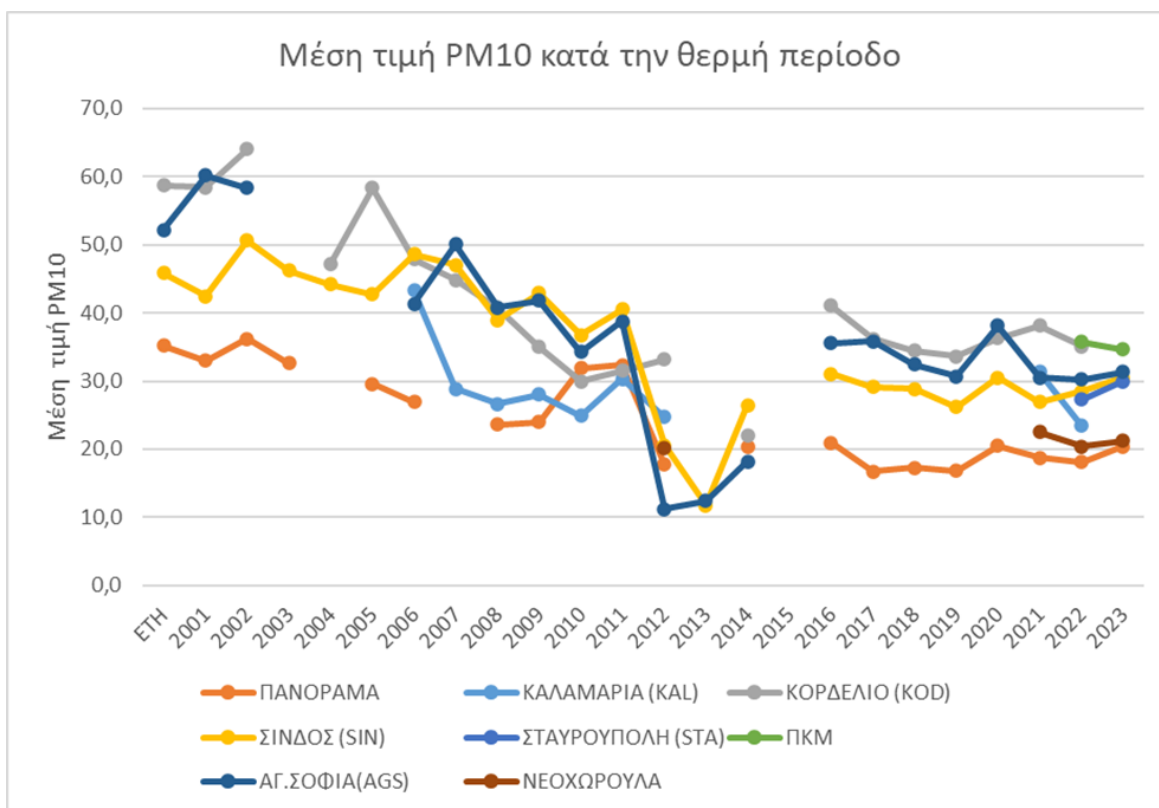
Η σύγκριση μεταξύ θερμής και ψυχρής περιόδου αναδεικνύει σαφή εποχική διαφοροποίηση. Κατά την ψυχρή περίοδο, οι μέσες συγκεντρώσεις PM10 εμφανίζονται αυξημένες στους περισσότερους σταθμούς, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στις αυξημένες εκπομπές από τη καύση στερεών καυσίμων για θέρμανση και στις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές και η μειωμένη ένταση των ανέμων, που περιορίζουν τη διασπορά των ρύπων και ευνοούν τον εγκλωβισμό τους κοντά στην επιφάνεια.

Αντίθετα, κατά τη θερμή περίοδο (Μάιος–Σεπτέμβριος), παρατηρείται γενικά μείωση των συγκεντρώσεων PM10. Η βελτιωμένη ατμοσφαιρική ανάμειξη, λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών και εντονότερης ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και η απουσία εκπομπών από συστήματα θέρμανσης, συμβάλλουν στη διάχυση και αραιώση των ρύπων. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να καταγράφονται τοπικές αυξήσεις, οι οποίες σχετίζονται με επαναιώρηση σκόνης.

Η εποχική διαφοροποίηση δεν είναι ομοιόμορφη για όλους τους σταθμούς. Οι αστικοί σταθμοί κυκλοφορίας (Αγία Σοφία, Σταυρούπολη, ΠΚΜ) παρουσιάζουν εντονότερη εποχική διακύμανση, λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της κυκλοφορίας και της θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο. Αντίθετα, οι σταθμοί υποβάθρου (Πανόραμα, Νεοχωρούδα, Καλαμαριά) εμφανίζουν μικρότερες διακυμάνσεις, καθώς αντανακλούν κυρίως την περιφερειακή ρύπανση και όχι έντονες τοπικές πηγές.

Οι υψηλότερες μέσες συγκεντρώσεις PM10 καταγράφονται στους αστικούς και βιομηχανικούς σταθμούς. Ειδικότερα, κατά τη θερμή περίοδο, οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στους σταθμούς Κορδελιό και Αγία Σοφία, ενώ ακολουθούν οι σταθμοί Σίνδος, Καλαμαριά και Νεοχωρούδα, με τον σταθμό Πανόραμα να παρουσιάζει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Η αυξημένη ρύπανση στους σταθμούς αυτούς αποδίδεται στην έντονη κυκλοφοριακή και βιομηχανική δραστηριότητα.

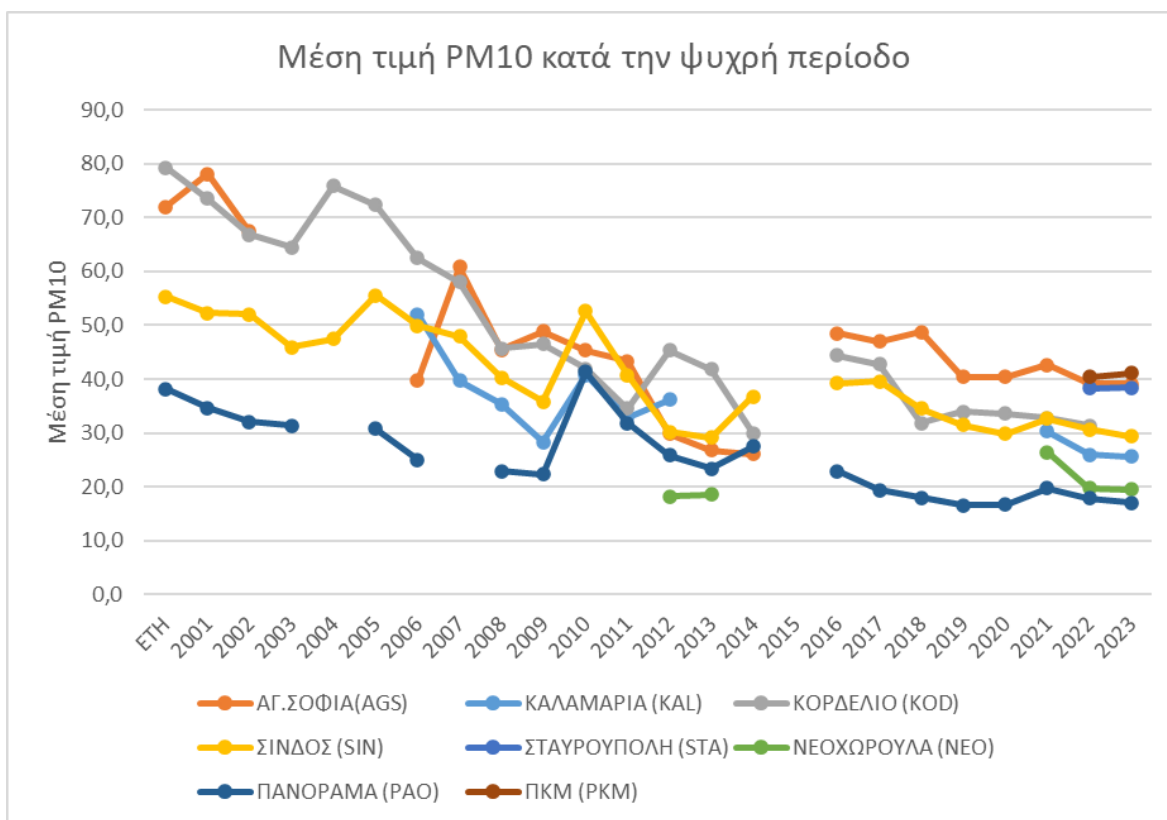
Συνολικά, οι διαφορές στις μέσες συγκεντρώσεις PM10 μεταξύ των σταθμών και των εποχών αποτυπώνουν την επίδραση των ανθρωπογενών εκπομπών και τη μεταβλητότητα των μετεωρολογικών συνθηκών κάθε εποχής αναδεικνύοντας την πολυπλοκότητα των μηχανισμών που καθορίζουν την ποιότητα του αέρα στην αστική και περιαστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.



Διάγραμμα 33 Χρονοσειρά μέσης τιμής PM10 κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ PM10 ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (ΜΑΙΟΣ-ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ) |               |                 |                |              |                   |                  |                |           |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|----------------|-----------|
| ΕΤΗ                                                                     | ΑΓ.ΣΟΦΙΑ(ΑΓΣ) | ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ (ΚΑΛ) | ΚΟΡΔΕΛΙΟ (ΚΟΔ) | ΣΙΝΔΟΣ (ΣΙΝ) | ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ (ΣΤΑ) | ΝΕΟΧΩΡΟΥΛΑ (ΝΕΟ) | ΠΑΝΟΡΑΜΑ (ΡΑΟ) | ΠΚΜ (ΡΚΜ) |
| 2001                                                                    | 52,2          |                 | 58,7           | 45,9         |                   |                  | 35,2           |           |
| 2002                                                                    | 60,2          |                 | 58,4           | 42,4         |                   |                  | 33,0           |           |
| 2003                                                                    | 58,3          |                 | 64,1           | 50,6         |                   |                  | 36,2           |           |
| 2004                                                                    |               |                 |                | 46,2         |                   |                  | 32,6           |           |
| 2005                                                                    |               |                 | 47,2           | 44,2         |                   |                  |                |           |
| 2006                                                                    |               |                 | 58,3           | 42,7         |                   |                  | 29,6           |           |
| 2007                                                                    | 41,4          | 43,2            | 47,9           | 48,6         |                   |                  | 27,0           |           |
| 2008                                                                    | 50,1          | 28,8            | 44,8           | 47,0         |                   |                  |                |           |
| 2009                                                                    | 40,8          | 26,7            | 40,7           | 39,0         |                   |                  | 23,6           |           |
| 2010                                                                    | 41,8          | 28,0            | 35,0           | 42,9         |                   |                  | 24,0           |           |
| 2011                                                                    | 34,3          | 24,9            | 29,9           | 36,8         |                   |                  | 31,8           |           |
| 2012                                                                    | 38,8          | 30,3            | 31,5           | 40,5         |                   |                  | 32,3           |           |
| 2013                                                                    | 11,2          | 24,7            | 33,1           | 20,5         |                   | 20,2             | 17,7           |           |
| 2014                                                                    | 12,4          |                 |                | 11,8         |                   |                  |                |           |
| 2015                                                                    | 18,2          |                 | 22,0           | 26,4         |                   |                  | 20,3           |           |
| 2016                                                                    |               |                 |                |              |                   |                  |                |           |
| 2017                                                                    | 35,5          |                 | 41,1           | 31,1         |                   |                  | 21,0           |           |
| 2018                                                                    | 35,8          |                 | 36,3           | 29,1         |                   |                  | 16,7           |           |
| 2019                                                                    | 32,5          |                 | 34,5           | 28,9         |                   |                  | 17,2           |           |
| 2020                                                                    | 30,7          |                 | 33,6           | 26,2         |                   |                  | 16,8           |           |
| 2021                                                                    | 38,1          |                 | 36,3           | 30,5         |                   |                  | 20,5           |           |
| 2022                                                                    | 30,5          | 31,3            | 38,2           | 26,9         |                   | 22,5             | 18,8           |           |
| 2023                                                                    | 30,2          | 23,4            | 35,1           | 28,5         | 27,3              | 20,4             | 18,1           | 35,7      |
| 2024                                                                    | 31,4          |                 |                | 30,5         | 29,9              | 21,2             | 20,4           | 34,7      |

Πίνακας 5 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM10 κατά την θερμή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης



Διάγραμμα 34 Χρονοσειρά μέσης τιμής PM10 κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ PM10 ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΨΥΧΡΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ-ΑΠΡΙΛΙΟΣ) |                |                 |                |              |                   |                  |                |           |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|----------------|-----------|
| ΕΤΗ                                                                      | ΑΓ.ΣΟΦΙΑ (AGS) | ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ (ΚΑΛ) | ΚΟΡΔΕΛΙΟ (ΚΟΔ) | ΣΙΝΔΟΣ (SIN) | ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ (STA) | ΝΕΟΧΩΡΟΥΛΑ (ΝΕΟ) | ΠΑΝΟΡΑΜΑ (ΡΑΟ) | ΠΚΜ (ΡΚΜ) |
| 2001                                                                     | 72,1           |                 | 79,3           | 55,4         |                   |                  | 38,2           |           |
| 2002                                                                     | 78,1           |                 | 73,6           | 52,2         |                   |                  | 34,6           |           |
| 2003                                                                     | 67,4           |                 | 66,9           | 52,0         |                   |                  | 32,1           |           |
| 2004                                                                     |                |                 | 64,6           | 45,9         |                   |                  | 31,3           |           |
| 2005                                                                     |                |                 | 75,9           | 47,5         |                   |                  |                |           |
| 2006                                                                     |                |                 | 72,4           | 55,6         |                   |                  | 30,8           |           |
| 2007                                                                     | 39,7           | 52,0            | 62,5           | 50,0         |                   |                  | 25,0           |           |
| 2008                                                                     | 60,8           | 39,7            | 58,1           | 47,9         |                   |                  |                |           |
| 2009                                                                     | 45,4           | 35,4            | 45,7           | 40,3         |                   |                  | 22,9           |           |
| 2010                                                                     | 48,9           | 28,3            | 46,5           | 35,8         |                   |                  | 22,3           |           |
| 2011                                                                     | 45,4           | 40,8            | 42,0           | 52,7         |                   |                  | 41,4           |           |
| 2012                                                                     | 43,4           | 32,9            | 34,6           | 40,8         |                   |                  | 31,8           |           |
| 2013                                                                     | 29,9           | 36,2            | 45,4           | 30,2         |                   | 18,2             | 25,8           |           |
| 2014                                                                     | 26,8           |                 | 41,8           | 29,2         |                   | 18,6             | 23,4           |           |
| 2015                                                                     | 26,0           |                 | 30,0           | 36,8         |                   |                  | 27,5           |           |
| 2016                                                                     |                |                 |                |              |                   |                  |                |           |
| 2017                                                                     | 48,6           |                 | 44,4           | 39,3         |                   |                  | 22,9           |           |
| 2018                                                                     | 47,0           |                 | 42,7           | 39,6         |                   |                  | 19,4           |           |
| 2019                                                                     | 48,8           |                 | 31,8           | 34,5         |                   |                  | 18,0           |           |
| 2020                                                                     | 40,4           |                 | 34,0           | 31,5         |                   |                  | 16,6           |           |
| 2021                                                                     | 40,4           |                 | 33,7           | 29,9         |                   |                  | 16,7           |           |
| 2022                                                                     | 42,6           | 30,3            | 32,8           | 32,7         |                   | 26,4             | 19,8           |           |
| 2023                                                                     | 39,3           | 25,9            | 31,4           | 30,7         | 38,3              | 19,8             | 17,9           | 40,4      |
| 2024                                                                     | 39,1           | 25,6            |                | 29,4         | 38,4              | 19,5             | 17,0           | 41,2      |

Πίνακας 6 Μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM10 κατά την ψυχρή περίοδο στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης

### 3.9 Εφαρμογή και Αξιολόγηση Κατανομών στα ωριαία δεδομένα PM10 της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2017-2024

Η ανάλυση των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 στους οκτώ σταθμούς μέτρησης (Αγία Σοφία, Καλαμαριά, Κορδελιό, Σίνδος, Σταυρούπολη, Νεοχωρούδα, Πανόραμα, ΠΚΜ) έδειξε ότι η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα σε σύγκριση με την κανονική κατανομή. Συγκεκριμένα, οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) για την κατανομή Gamma κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα (περίπου 0.85–0.98), υποδηλώνοντας πολύ καλή προσαρμογή, ενώ για την κανονική κατανομή οι αντίστοιχες τιμές είναι αισθητά χαμηλότερες. Παράλληλα, οι τιμές του στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$  είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με την κανονική κατανομή.

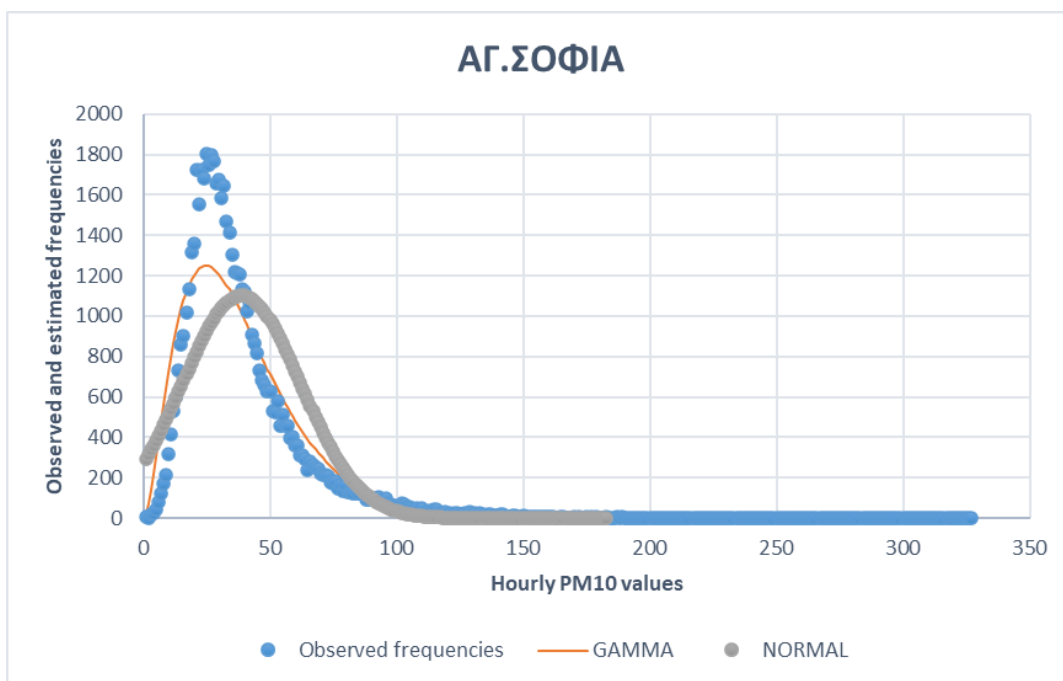
| ΣΤΑΘΜΟΙ PM10                          | Κατανομή | Συντελεστής R2 |                |                | Chi-square ( $\chi^2$ ) |                |                |
|---------------------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|
|                                       |          |                | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |                         | Θερμή περίοδος | Ψυχρή περίοδος |
| ΑΓ.ΣΟΦΙΑ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)     | Gamma    | 0,91           | 0,95           | 0,96           | 46582,3                 | 3512955        | 5350,39        |
|                                       | Κανονική | 0,75           | 0,85           | 0,77           | 2,9E+30                 | 2,5E+30        | 2,96E+21       |
| ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ<br>(Αστικός Υποβάθρου)      | Gamma    | 0,94           | 0,98           | 0,97           | 30089,5                 | 622551,4       | 1902,17        |
|                                       | Κανονική | 0,82           | 0,91           | 0,79           | 2,0E+34                 | 5,96E+31       | 1,3E+22        |
| ΚΟΡΔΕΛΙΟ<br>(Αστικός Βιομηχανικός)    | Gamma    | 0,88           | 0,90           | 0,92           | 819789                  | 5,09E+12       | 83508,58       |
|                                       | Κανονική | 0,70           | 0,70           | 0,70           | 3,06E+50                | 6,87E+39       | 6,87E+39       |
| ΣΙΝΔΟΣ<br>(Περιαστικός Βιομηχανικός)  | Gamma    | 0,95           | 0,94           | 0,97           | 1,98E+12                | 4,37E+09       | 2,57E+10       |
|                                       | Κανονική | 0,81           | 0,82           | 0,80           | 8,5E+142                | 1,75E+81       | 1,14E+115      |
| ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)  | Gamma    | 0,86           | 0,94           | 0,90           | 10610                   | 9826,22        | 1807,86        |
|                                       | Κανονική | 0,68           | 0,83           | 0,64           | 3,8E+27                 | 2,43E+18       | 3,42E+18       |
| ΝΕΟΧΩΡΟΥΔΑ<br>(Περιαστικός Υποβάθρου) | Gamma    | 0,94           | 0,97           | 0,89           | 2,4E+09                 | 1,64E+15       | 159700,2       |
|                                       | Κανονική | 0,83           | 0,88           | 0,74           | 1,9E+96                 | 1,3E+146       | 6,68E+38       |
| ΠΑΝΟΡΑΜΑ<br>(Περιαστικός Υποβάθρου)   | Gamma    | 0,96           | 0,96           | 0,94           | 1,4E+13                 | 9338660        | 3,19E+10       |
|                                       | Κανονική | 0,86           | 0,88           | 0,81           | 4E+152                  | 6,5E+44        | 2,1E+124       |
| ΠΚΜ<br>(Αστικός Κυκλοφορίας)          | Gamma    | 0,88           | 0,85           | 0,90           | 74552                   | 2776765        | 11265,26       |
|                                       | Κανονική | 0,71           | 0,72           | 0,66           | 8,4E+38                 | 3,73E+45       | 2,41E+29       |

**Πίνακας 7** Πίνακας συντελεστών R2 και  $\chi^2$  της κανονικής κατανομής και της gamma κατανομής για τις συγκεντρώσεις PM10

Η καταλληλότητα της κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα, όπου παρατηρείται ότι τα δεδομένα PM10 εμφανίζουν θετική ασυμμετρία με την παρουσία ακραίων υψηλών τιμών και εκτεταμένη ουρά προς τα δεξιά. Η μορφή αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό των ατμοσφαιρικών ρύπων και αντανακλά στη φύση των πηγών εκπομπής και των μετεωρολογικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά των αιωρούμενων σωματιδίων. Η κανονική κατανομή, λόγω της συμμετρικής της φύσης, δεν μπορεί να αποδώσει επαρκώς αυτή τη συμπεριφορά, υποεκτιμώντας τις υψηλές συγκεντρώσεις και αποκλίνοντας από τη μορφή των διαγραμμάτων. Αντιθέτως, η κατανομή Gamma, ως ασύμμετρη κατανομή, προσαρμόζεται αποτελεσματικά στα δεδομένα.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή και σχολιασμός των διαγραμμάτων σύγκρισης παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων και των διαγραμμάτων γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων για κάθε σταθμό για το σύνολο των δεδομένων και για τις περιόδους, θερμή (Μάιος-Σεπτέμβριος) και ψυχρή (Οκτώβριος-Απρίλιος).

- Σταθμός μέτρησης Αγ.Σοφία (Αστικός Κυκλοφορίας)

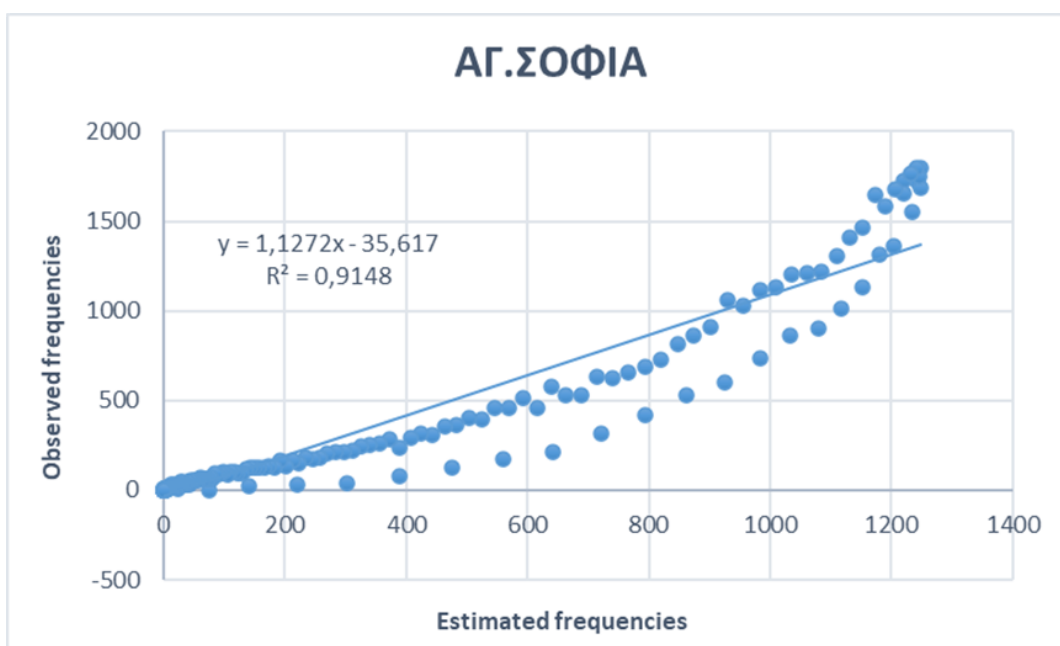


**Διάγραμμα 35 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)**

Στο Διάγραμμα 35 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 στον σταθμό αστικού κυκλοφοριακού υποβάθρου Αγίας Σοφίας, καθώς και οι θεωρητικές καμπύλες της κανονικής και της κατανομής Gamma. Παρατηρείται ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων είναι έντονα δεξιά ασύμμετρη, με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης να εντοπίζεται στα  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , όπου οι παρατηρούμενες συχνότητες προσεγγίζουν τις 18001 εμφανίσεις. Αντίθετα, όσο αυξάνονται οι συγκεντρώσεις PM10, η συχνότητα μειώνεται σημαντικά, ενώ διατηρείται μία μακριά δεξιά ουρά που εκτείνεται μέχρι τα  $327 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Η κατανομή Gamma ακολουθεί καλύτερα τη μορφή των παρατηρούμενων δεδομένων, αποδίδοντας ικανοποιητικότερα τόσο την κορυφή της κατανομής όσο και τη δεξιά ουρά. Αντίθετα, η κανονική κατανομή εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις, κυρίως στις υψηλές συγκεντρώσεις, καθώς προϋποθέτει συμμετρική κατανομή των δεδομένων. Η υπεροχή της κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες προσαρμογής, καθώς παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή  $R^2=0,91$  έναντι της τιμής  $R^2=0,75$  της κανονικής κατανομής.

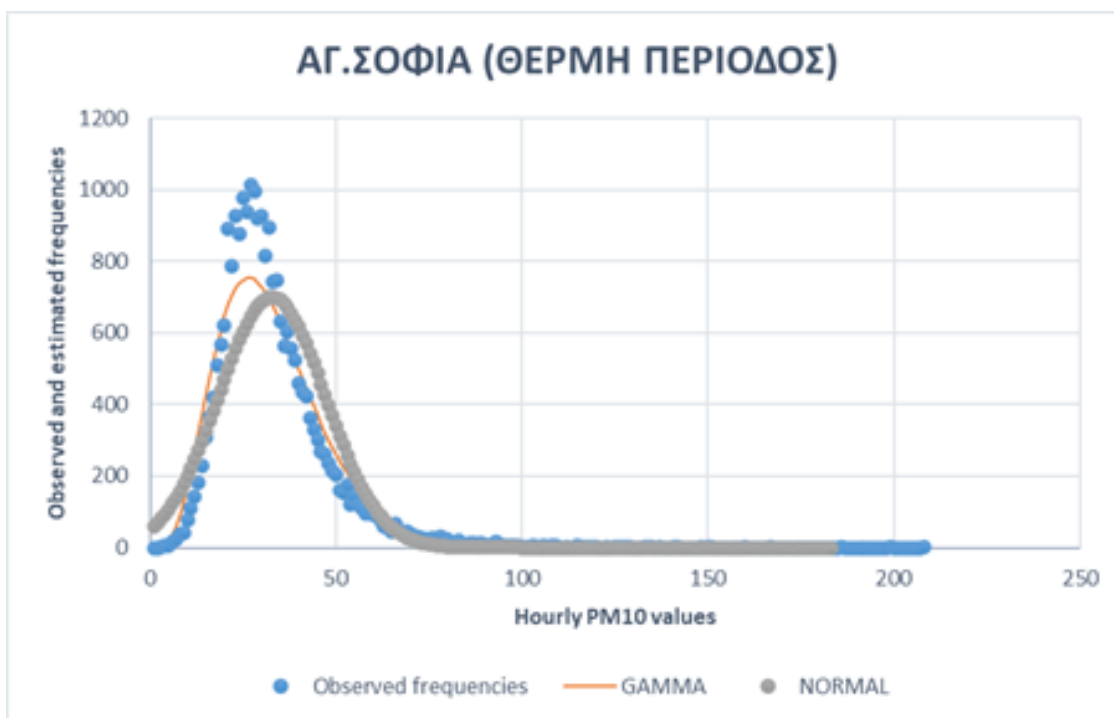
Το Διάγραμμα 36, στο οποίο απεικονίζεται η σχέση μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων, επιβεβαιώνει τη γενικά καλή προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής Gamma. Η πλειονότητα των σημείων ακολουθεί τη γραμμική τάση, γεγονός που υποδηλώνει ότι το θεωρητικό μοντέλο περιγράφει με υψηλή ακρίβεια την κατανομή των συγκεντρώσεων PM10. Οι μικρές αποκλίσεις που εμφανίζονται στις υψηλές συγκεντρώσεις είναι αναμενόμενες και σχετίζονται με την εμφάνιση επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης.



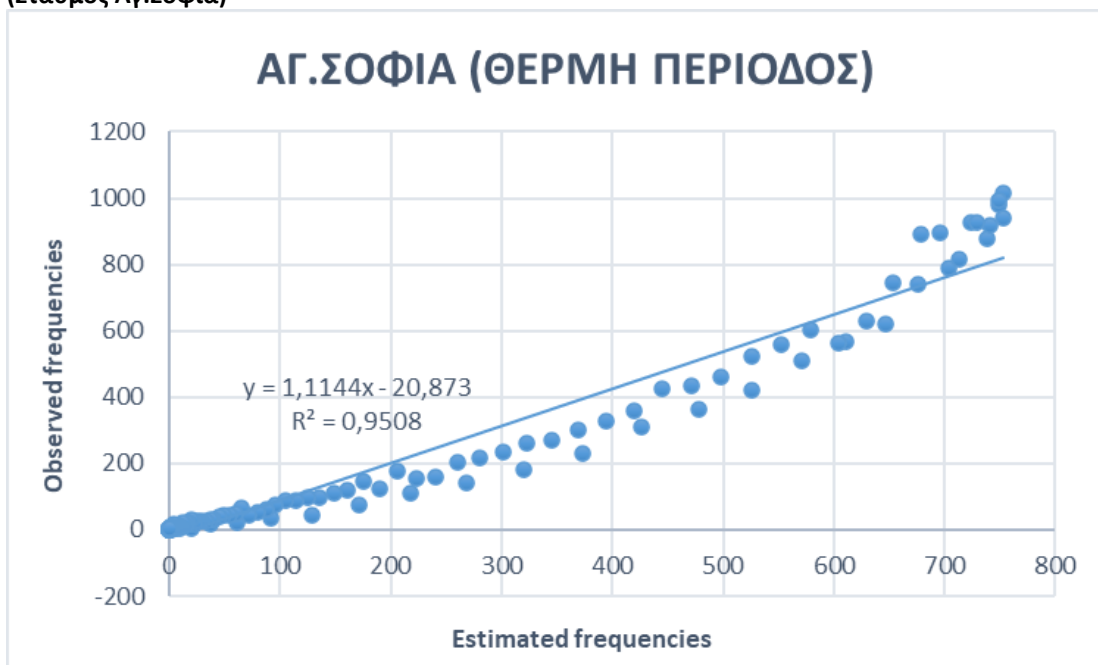
**Διάγραμμα 36** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 37), οι ωριαίες συγκεντρώσεις PM10 εμφανίζουν επίσης θετική ασυμμετρία, με τη μέγιστη συχνότητα εμφάνισης να καταγράφεται στα 27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , όπου οι παρατηρούμενες συχνότητες προσεγγίζουν τις 1014 εμφανίσεις. Οι περισσότερες τιμές συγκεντρώνονται σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ οι υψηλότερες εμφανίζονται με σημαντικά μικρότερη συχνότητα, δημιουργώντας χαρακτηριστική δεξιά ουρά που εκτείνεται μέχρι περίπου τα 208  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Η κατανομή Gamma προσεγγίζει ικανοποιητικότερα τη μορφή των δεδομένων, ακολουθώντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο την κορυφή όσο και την ουρά της κατανομής. Αντίθετα, η κανονική κατανομή παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις στις υψηλές συγκεντρώσεις, καθώς αδυνατεί να αποδώσει πλήρως την ασυμμετρία των δεδομένων. Η καλύτερη προσαρμογή της κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται από την τιμή του συντελεστή  $R^2 = 0,95$  έναντι της τιμής  $R^2 = 0,85$  της κανονικής Κατανομής.



**Διάγραμμα 37** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)



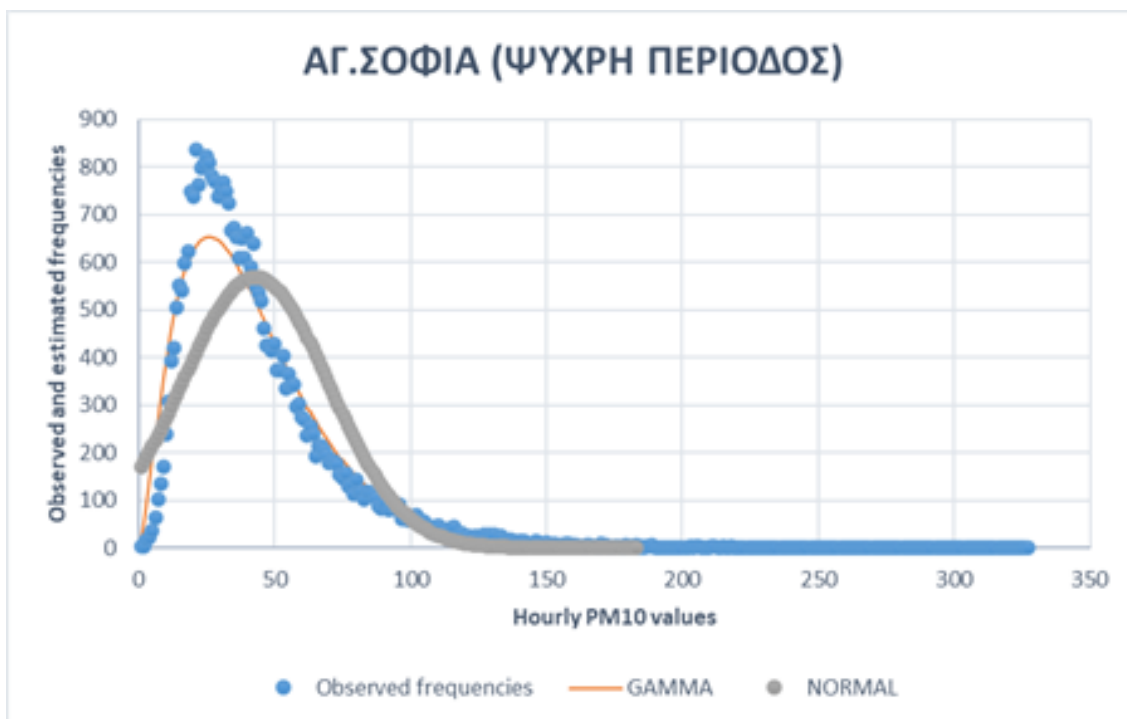
**Διάγραμμα 38** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)

Στο Διάγραμμα 38 η συσχέτιση μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφανίζει έντονη γραμμική τάση με ικανοποιητική προσαρμογή του συνόλου των δεδομένων. Ωστόσο, για τις μεγαλύτερες συχνότητες παρατηρείται ελαφρά απόκλιση των

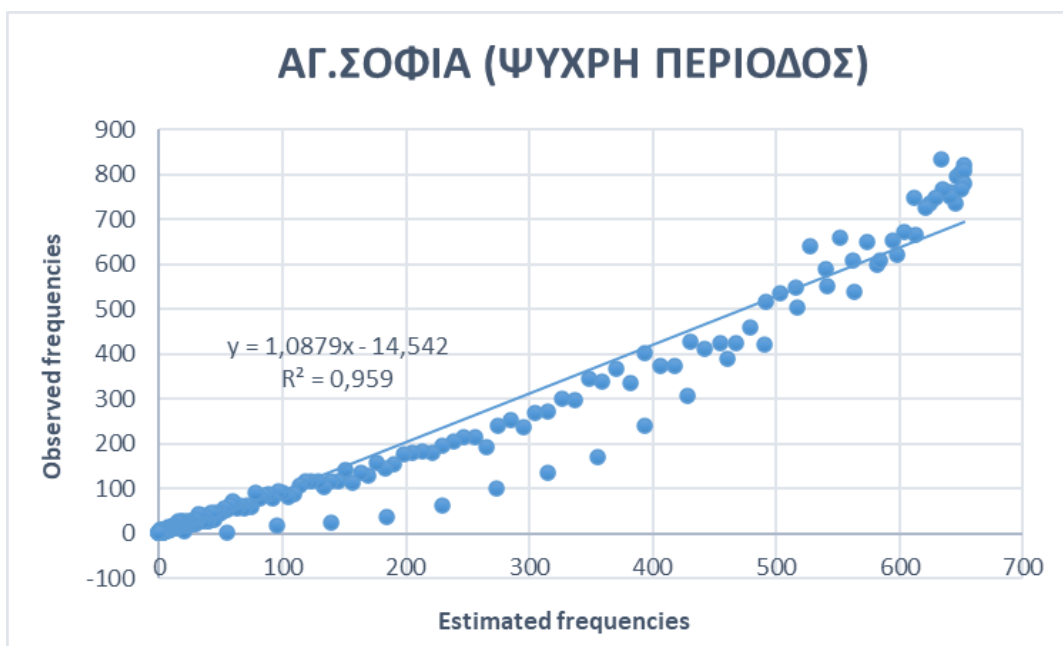
σημείων, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι θεωρητικές κατανομές δυσκολεύονται να περιγράψουν πλήρως τις ακραίες συγκεντρώσεις που εμφανίζονται κατά τη θερμή περίοδο.

Κατά την ψυχρή περίοδο (Διάγραμμα 39), οι συγκεντρώσεις PM10 εξακολουθούν να παρουσιάζουν έντονα δεξιά ασύμμετρη κατανομή. Η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παρατηρείται στα  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με μέγιστες συχνότητες που προσεγγίζουν τις 823 εμφανίσεις. Παράλληλα, η κατανομή εμφανίζει μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τη θερμή περίοδο, καθώς η δεξιά ουρά εκτείνεται μέχρι περίπου τα  $327 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα κατά την ψυχρή περίοδο στις παρατηρούμενες συχνότητες, την κορυφή όσο και τις υψηλές συγκεντρώσεις, ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις. Η καλύτερη προσαρμογή της κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται από την τιμή του συντελεστή  $R^2=0,96$  έναντι της τιμής  $R^2=0,77$  της κανονικής Κατανομής

Το Διάγραμμα 40 επιβεβαιώνει την καλή συσχέτιση μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων στην κατανομή Gamma, καθώς τα περισσότερα σημεία συγκεντρώνονται γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης. Στις υψηλότερες συχνότητες και στις ακραίες συγκεντρώσεις παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις, γεγονός που σχετίζεται με την αυξημένη κυκλοφοριακή επιβάρυνση, τη χρήση θέρμανσης και τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τον εγκλωβισμό των ρύπων κατά την ψυχρή περίοδο.

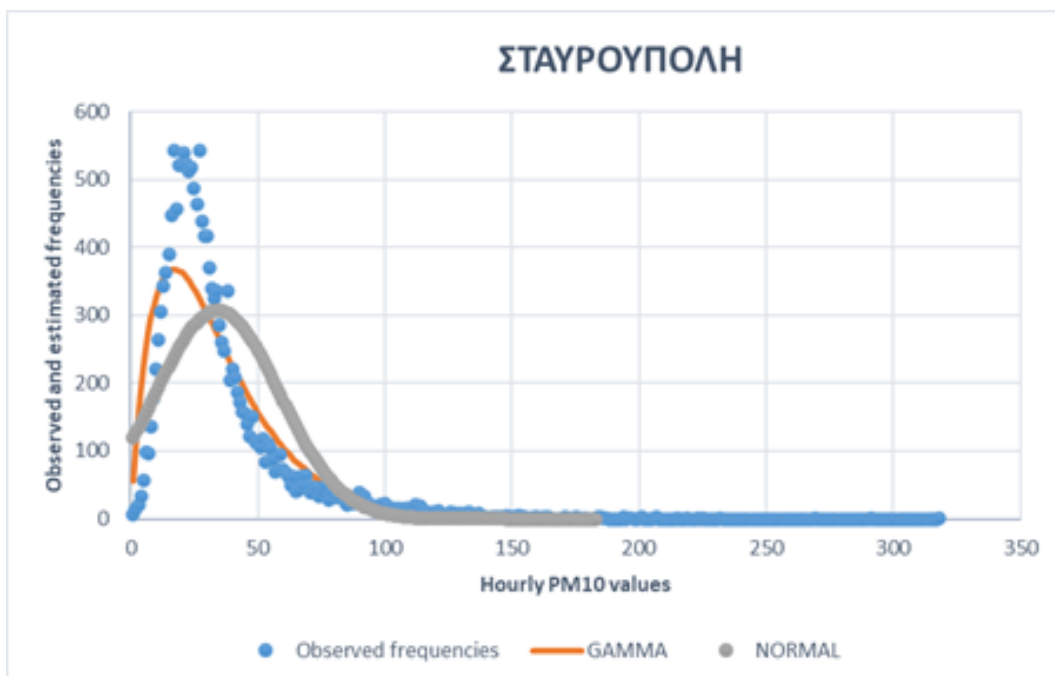


**Διάγραμμα 39** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)



**Διάγραμμα 40** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Αγ.Σοφία)

- Σταθμός μέτρησης Σταυρούπολη (Αστικός Κυκλοφορίας)



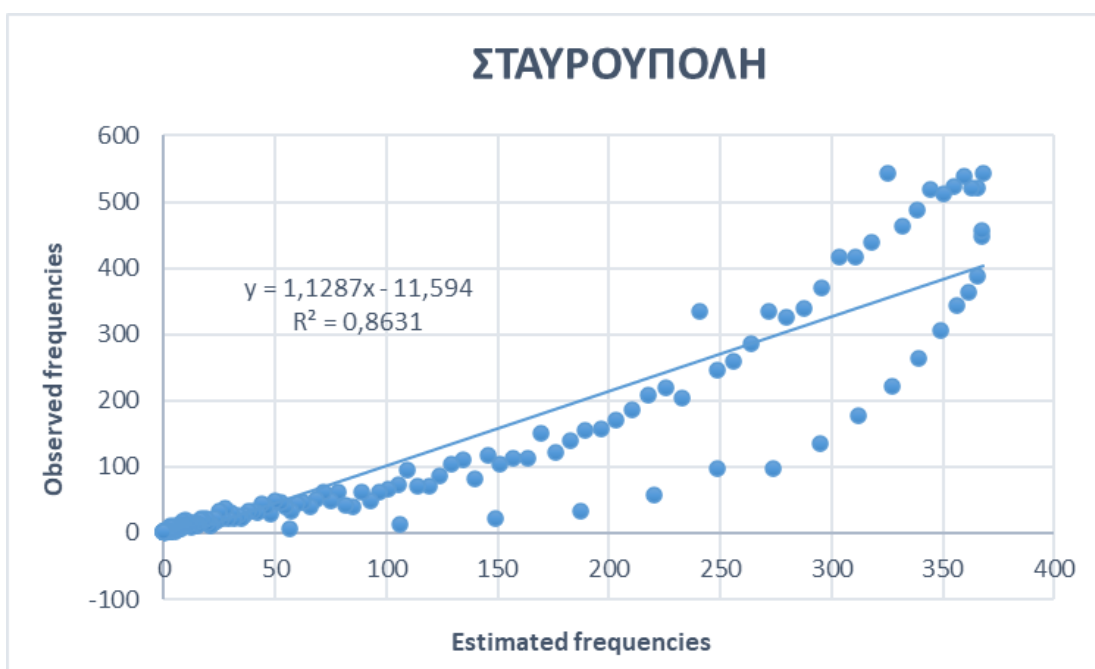
**Διάγραμμα 41** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σταυρούπολη)

Στο Διάγραμμα 41 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 στον σταθμό Σταυρούπολης, καθώς και οι θεωρητικές

καμπύλες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma. Η κατανομή είναι παρόμοια με αυτή του σταθμού Αγίας Σοφίας, δηλαδή οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν έντονη θετική ασυμμετρία, με τις περισσότερες τιμές να συγκεντρώνονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις και μικρό αριθμό επεισοδίων με πολύ υψηλές τιμές. Η μέγιστη συχνότητα παρατηρείται περίπου στα 27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως και τα 318  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει την περιστασιακή εμφάνιση επεισοδίων αυξημένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η μορφή αυτή είναι χαρακτηριστική των αιωρούμενων σωματιδίων, των οποίων οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται τόσο από τις εκπομπές της οδικής κυκλοφορίας όσο και από δευτερογενείς διεργασίες σχηματισμού, επαναιώρηση σκόνης και μεταφορά σωματιδίων από γειτονικές περιοχές.

Η κατανομή Gamma περιγράφει ικανοποιητικότερα τη μορφή των παρατηρούμενων δεδομένων, καθώς προσαρμόζεται καλύτερα τόσο στην περιοχή της κορυφής όσο και στις υψηλές συγκεντρώσεις, σε αντίθεση με την κανονική κατανομή, η οποία εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις. Η καλύτερη προσαρμογή επιβεβαιώνεται και από την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,86$  της κατανομής Gamma σε σχέση με την τιμή  $R^2=0,68$  της κανονικής κατανομής.

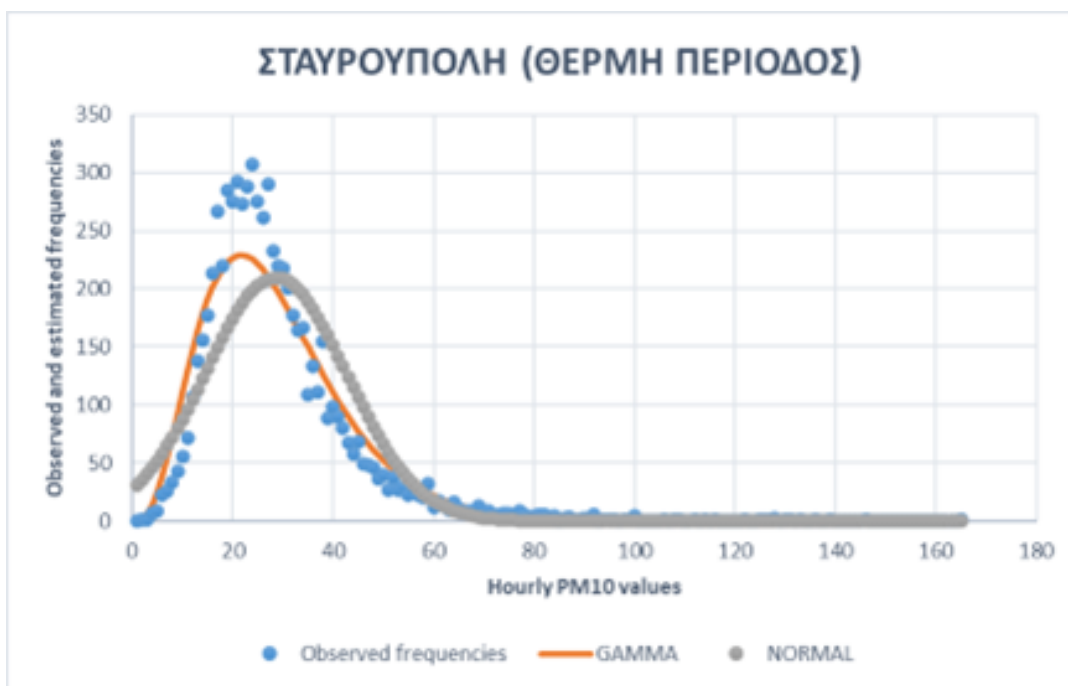
Το Διάγραμμα 42, στο οποίο απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων της κατανομής Gamma, επιβεβαιώνει την ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου, καθώς η πλειονότητα των σημείων συγκεντρώνεται κοντά στη γραμμή. Ωστόσο, παρατηρείται αυξημένη διασπορά για τις υψηλότερες συχνότητες, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων PM10 παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα πιθανότατα λόγω της επίδρασης της οδικής κυκλοφορίας και πρόσθετων τοπικών παραγόντων.



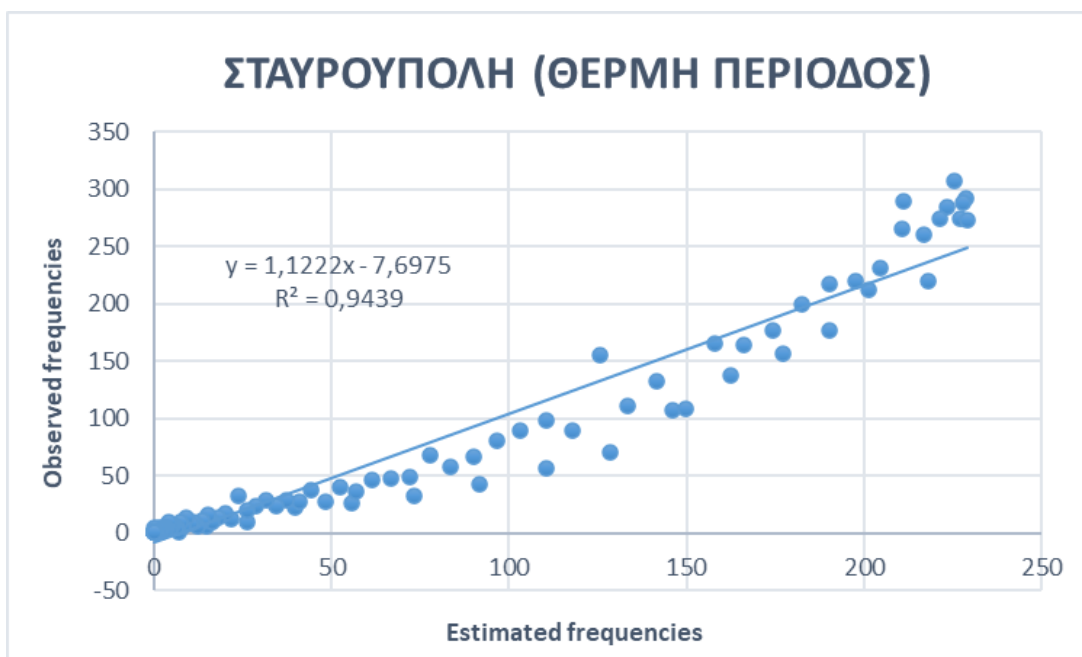
**Διάγραμμα 42** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Σταυρούπολη)

Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 44) οι περισσότερες συγκεντρώσεις συγκεντρώνονται περίπου μεταξύ 20 και 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η μέγιστη συχνότητα προσεγγίζει τις 320 εμφανίσεις. Η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως περίπου τα 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , παρουσιάζοντας σαφώς μικρότερη διασπορά σε σχέση με το σύνολο των δεδομένων. Η κατανομή Gamma ακολουθεί πολύ ικανοποιητικά τη μορφή των παρατηρούμενων συχνοτήτων, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την ιδιαίτερα υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,94$ . Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με τις ευνοϊκότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς που επικρατούν κατά τους θερινούς μήνες, οι οποίες περιορίζουν τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων.

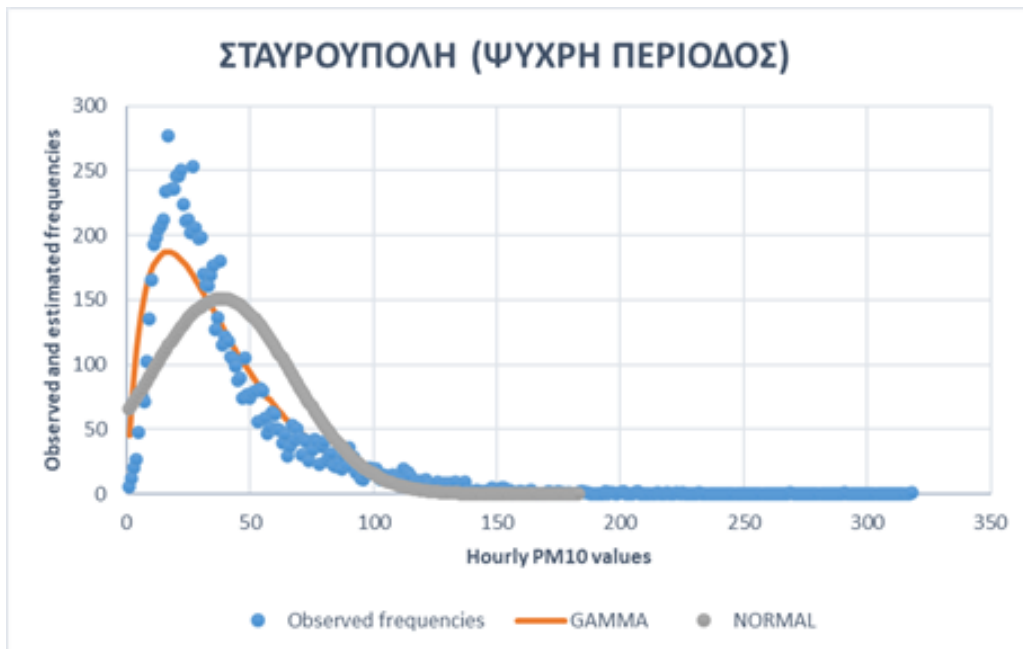
Στο διάγραμμα συσχέτισης (Διάγραμμα 45) τα περισσότερα σημεία βρίσκονται πολύ κοντά στη γραμμή ταύτισης, γεγονός που επιβεβαιώνει την εξαιρετική προσαρμογή της κατανομής Gamma κατά τη θερμή περίοδο.



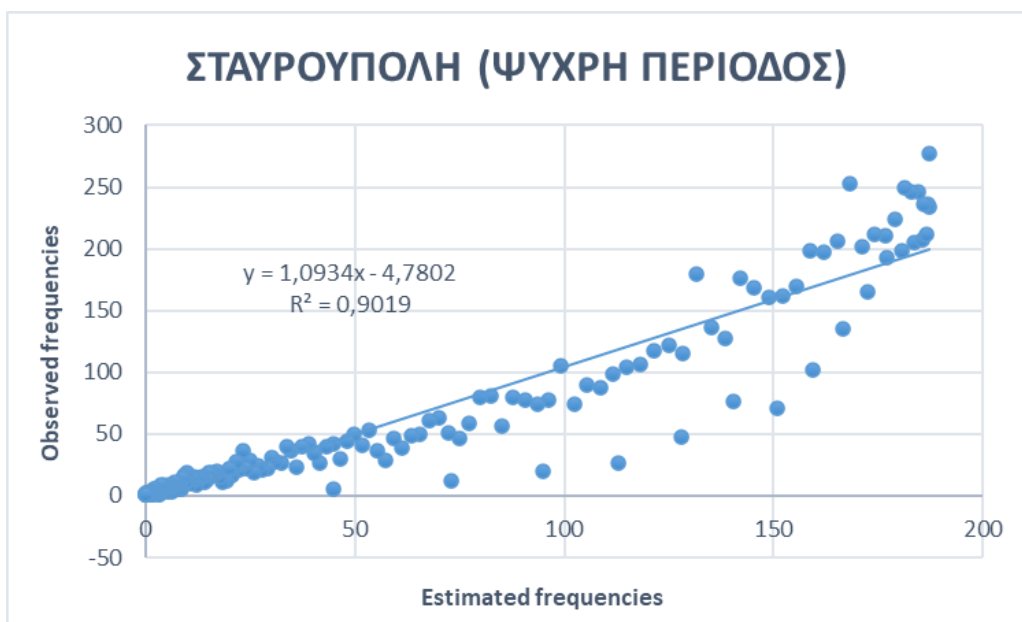
**Διάγραμμα 43** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη)



Διάγραμμα 44 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη)



Διάγραμμα 45 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη)

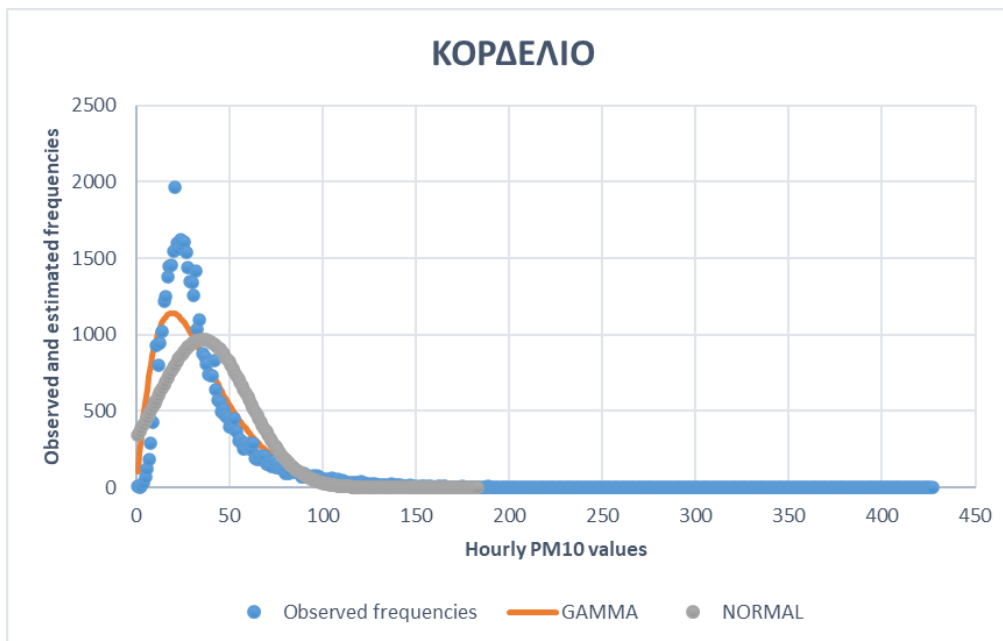


**Διάγραμμα 46** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σταυρούπολη)

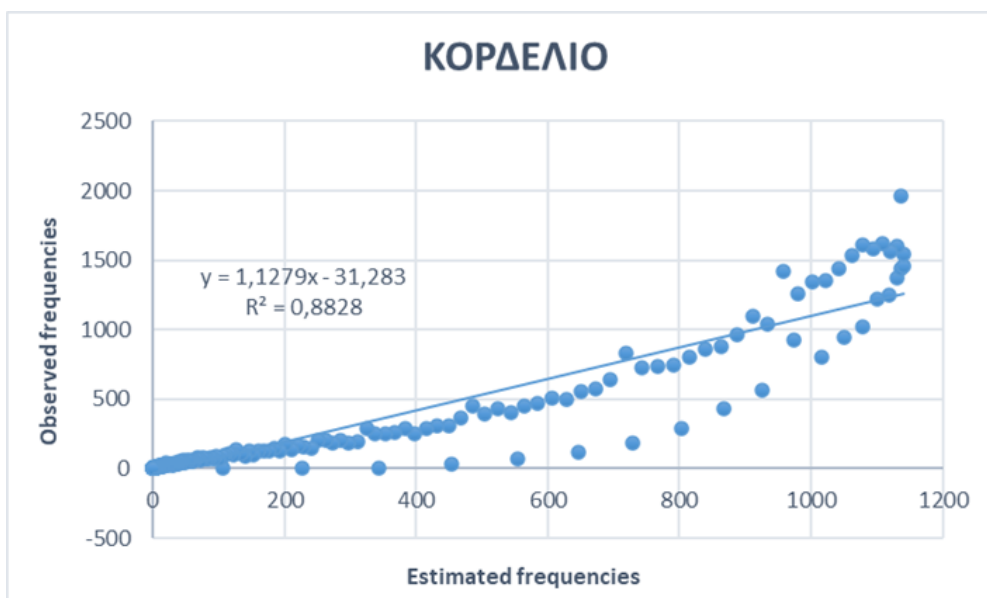
Κατά την ψυχρή περίοδο, η κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 εξακολουθεί να παρουσιάζει έντονη θετική ασυμμετρία, ωστόσο εμφανίζει μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τη θερμή περίοδο. Η δεξιά ουρά της κατανομής εκτείνεται έως περίπου τα  $318 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει συχνότερη εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων PM10 κατά τους ψυχρούς μήνες. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στις δυσμενέστερες μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά την περίοδο αυτή, όπως η μειωμένη ατμοσφαιρική ανάμειξη και οι θερμοκρασιακές αναστροφές.

Η κατανομή Gamma εξακολουθεί να παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή από την κανονική κατανομή, με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,90$ . Ωστόσο, η χαμηλότερη τιμή του  $R^2$  σε σύγκριση με τη θερμή περίοδο υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις PM10 κατά τους ψυχρούς μήνες περιγράφονται με μικρότερη ακρίβεια από τις θεωρητικές κατανομές, λόγω της αυξημένης ετερογένειας των πηγών εκπομπής και των δυσμενέστερων συνθηκών διασποράς. Το διάγραμμα συσχέτισης (Διάγραμμα 47) επιβεβαιώνει την παραπάνω διαπίστωση, καθώς παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των σημείων γύρω από τη γραμμή ταύτισης στις υψηλές συχνότητες, χωρίς όμως να αναιρείται η σαφής υπεροχή της κατανομής Gamma έναντι της κανονικής.

■ Σταθμός μέτρησης Κορδελιό (Αστικός Βιομηχανικός)



Διάγραμμα 47 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό)



Διάγραμμα 48 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Κορδελιό)

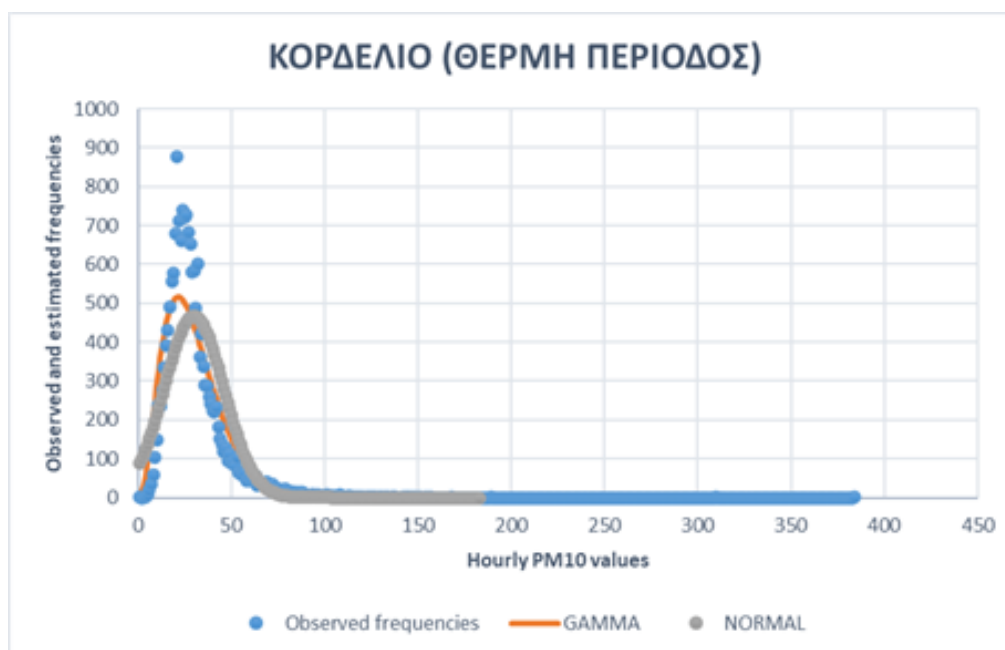
Στο Διάγραμμα 48 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 στον σταθμό Κορδελιό, καθώς και οι θεωρητικές καμπύλες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma. Η κατανομή των συγκεντρώσεων εμφανίζει έντονη θετική ασυμμετρία, με τη μεγαλύτερη συχνότητα να παρατηρείται σε συγκεντρώσεις περίπου 20–40 mg/m<sup>3</sup>, ενώ στη συνέχεια η συχνότητα

μειώνεται σταδιακά και η δεξιά ουρά εκτείνεται έως περίπου 417 mg/m<sup>3</sup>, υποδηλώνοντας την εμφάνιση επεισοδίων αυξημένων συγκεντρώσεων PM10.

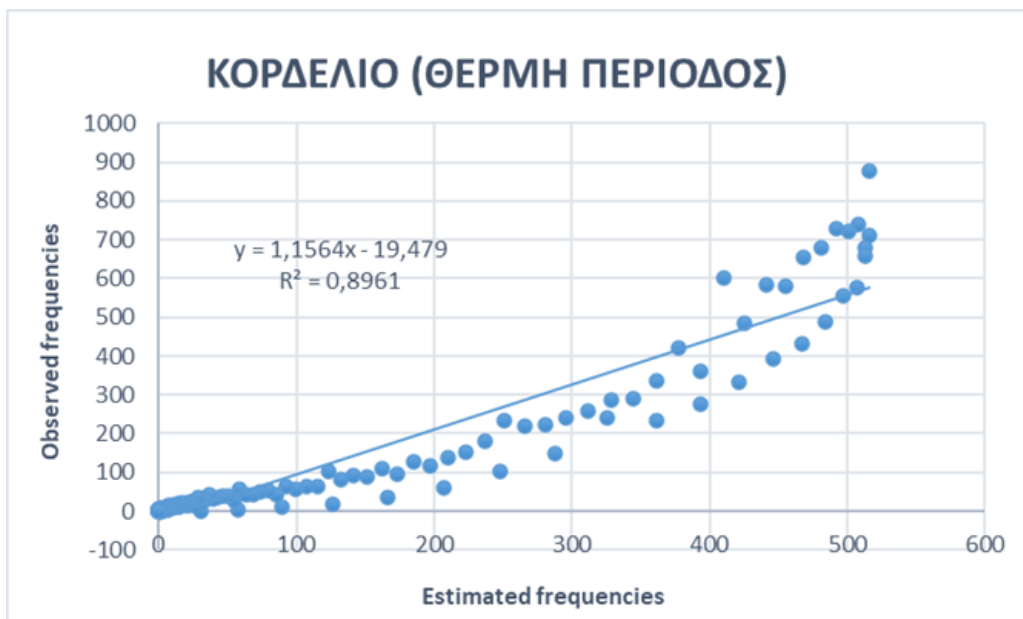
Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα στις παρατηρούμενες συχνότητες σε σχέση με την κανονική κατανομή, αποδίδοντας ικανοποιητικά τόσο την κορυφή όσο και τη δεξιά ουρά του ιστογράμματος. Ωστόσο, η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,88$  είναι χαμηλότερη από εκείνη που παρατηρείται στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, ενώ η κανονική κατανομή παρουσιάζει ακόμη μικρότερη προσαρμογή  $R^2=0,70$ . Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις PM10 στον σταθμό Κορδελιό παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα.

Το Διάγραμμα 49 επιβεβαιώνει επίσης την ικανοποιητική προσαρμογή της κατανομής Gamma, καθώς τα περισσότερα σημεία ακολουθούν τη γραμμή τάσης αν και εμφανίζεται μεγαλύτερη διασπορά συγκριτικά με τους σταθμούς κυκλοφορίας.

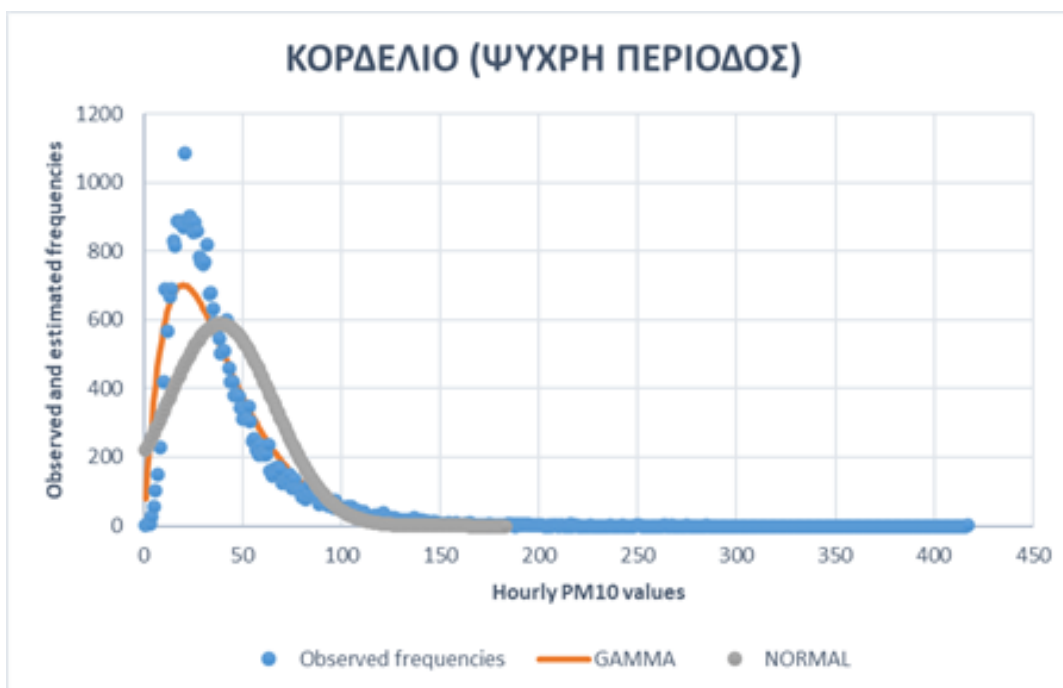
Κατά τη θερμή περίοδο (Διαγράμματα 50 και 51) οι περισσότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται περίπου στα 20–40 μg/m<sup>3</sup>, ενώ η δεξιά ουρά εκτείνεται έως περίπου 300 μg/m<sup>3</sup>. Η κατανομή Gamma παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμογή με τιμή  $R^2=0,90$ , σημαντικά υψηλότερη από την τιμή  $R^2=0,74$  της κανονικής κατανομής. Η σχετικά μικρότερη διασπορά των συγκεντρώσεων κατά τη θερμή περίοδο σχετίζεται με τις ευνοϊκότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς. Ωστόσο, η παρουσία υψηλών τιμών υποδηλώνει ότι εξακολουθούν να επηρεάζουν τον σταθμό η βιομηχανική δραστηριότητα, η επαναιώρηση της οδικής σκόνης και ο δευτερογενής σχηματισμός σωματιδίων, ενώ κατά διαστήματα ενδέχεται να συμβάλλουν και επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης.



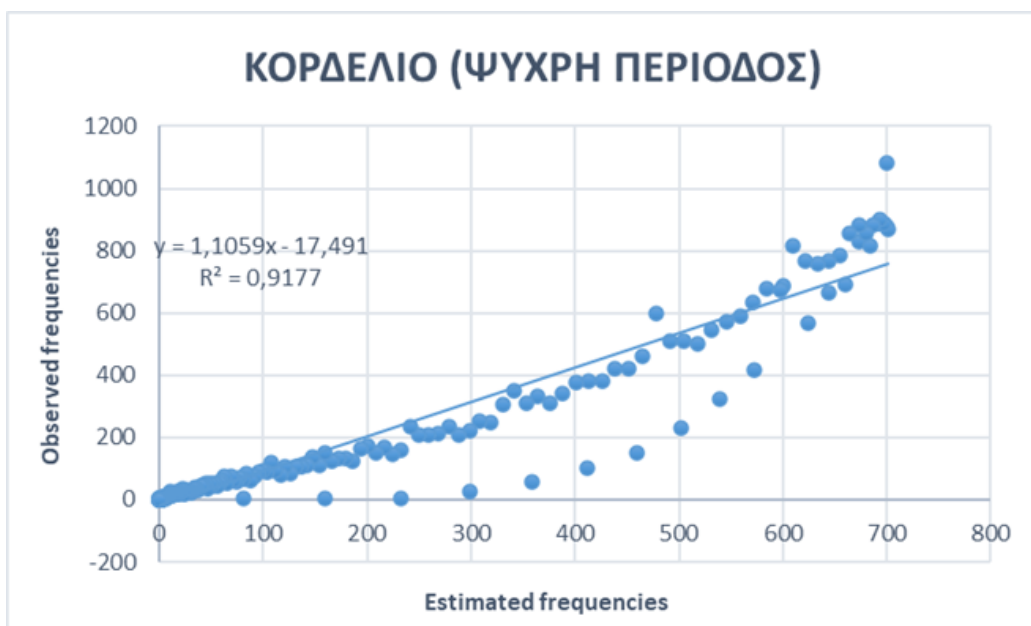
**Διάγραμμα 49** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)



Διάγραμμα 50 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)



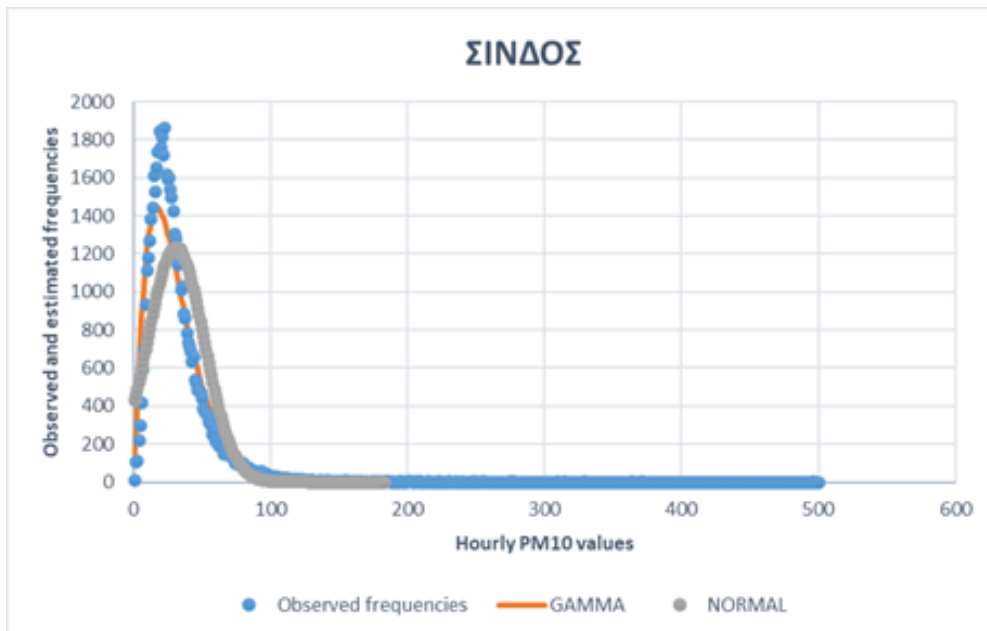
Διάγραμμα 51 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)



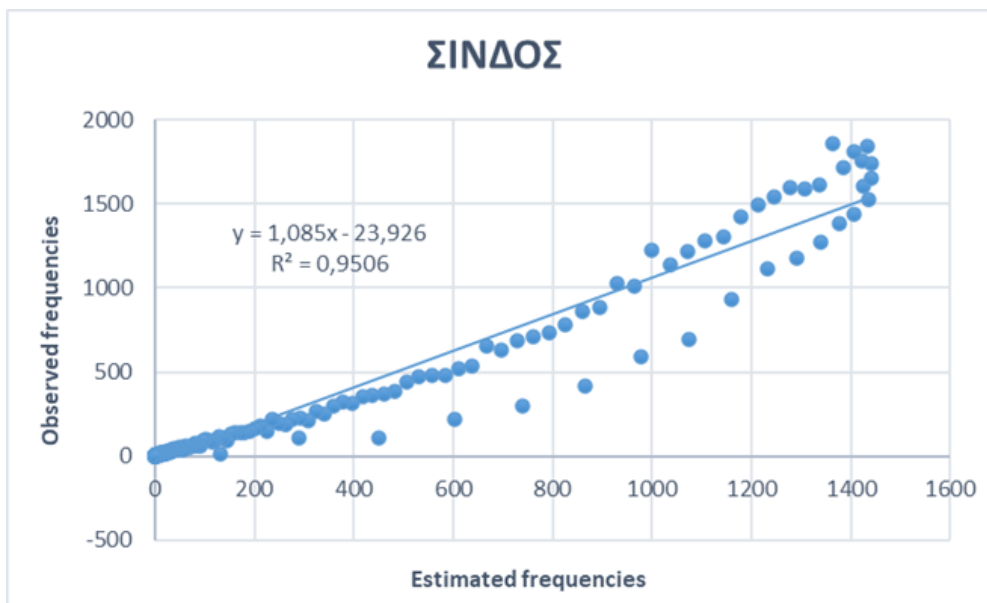
**Διάγραμμα 52 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Κορδελιό)**

Κατά την ψυχρή περίοδο (Διαγράμματα 52 και 53) παρατηρείται σημαντική αύξηση της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων, με τη δεξιά ουρά να εκτείνεται έως περίπου 417  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και να εμφανίζονται συχνότερα επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων. Παρότι η κατανομή Gamma εξακολουθεί να παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή από την κανονική ( $R^2=0,91$  έναντι 0,70), η μεγαλύτερη διασπορά των δεδομένων υποδηλώνει ότι κατά τους χειμερινούς μήνες στις ήδη υπάρχουσες πηγές εκπομπών προστίθενται οι εκπομπές από την οικιακή θέρμανση, ενώ οι δυσμενέστερες μετεωρολογικές συνθήκες, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές και η μειωμένη ανάμιξη της ατμόσφαιρας, ευνοούν τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων.

■ Σταθμός μέτρησης Σίνδος (Περιαστικός Βιομηχανικός)



Διάγραμμα 53 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος)



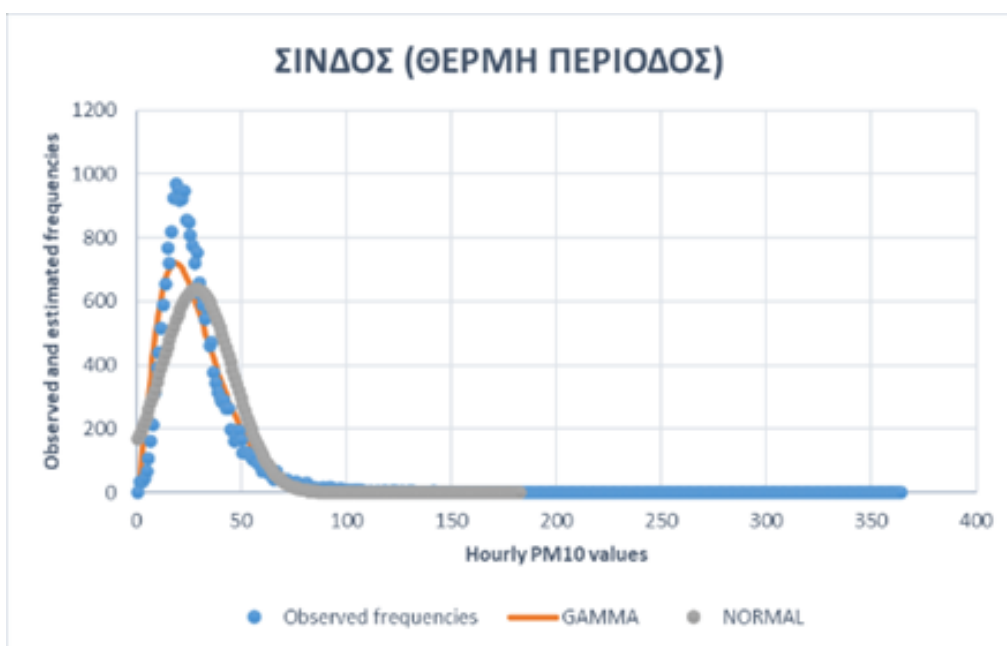
Διάγραμμα 54 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Σίνδος)

Σύμφωνα με το διάγραμμα 53 οι συγκεντρώσεις PM10 στον σταθμό Σίνδος εμφανίζουν έντονα ασύμμετρη κατανομή, με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης να παρατηρείται για συγκεντρώσεις περίπου 20–30 mg/m<sup>3</sup>, ενώ η δεξιά ουρά εκτείνεται έως περίπου 500mg/m<sup>3</sup>, υποδηλώνοντας την παρουσία επεισοδίων υψηλών συγκεντρώσεων. Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται πολύ ικανοποιητικά στα παρατηρούμενα δεδομένα με

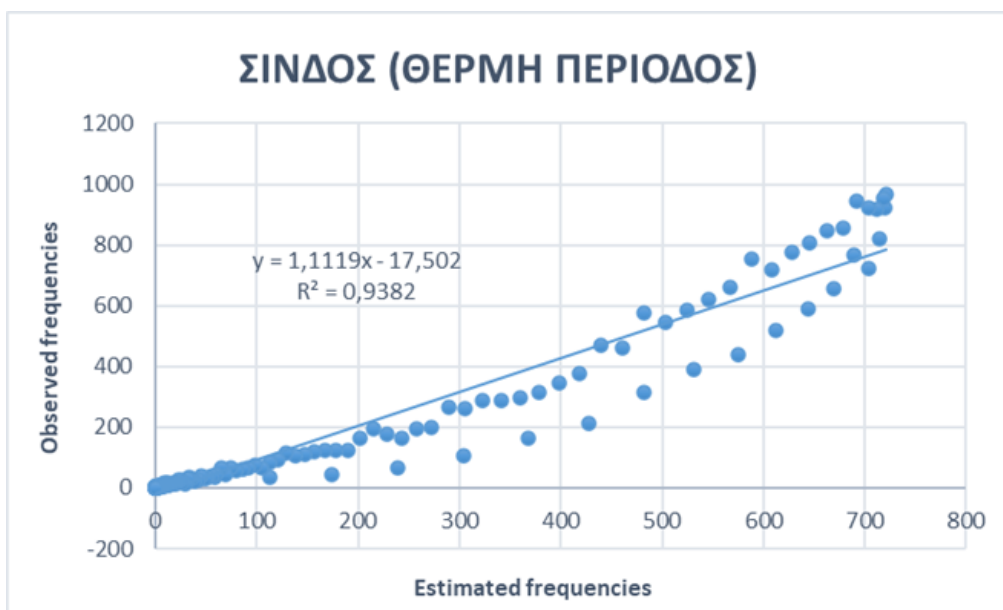
συντελεστή  $R^2=0,95$ , περιγράφοντας αποτελεσματικά τόσο την κορυφή όσο και την ασυμμετρία της κατανομής. Αντίθετα, η κανονική κατανομή παρουσιάζει σαφώς μικρότερη προσαρμογή  $R^2=0,81$ , καθώς δεν μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά τις υψηλές συγκεντρώσεις που χαρακτηρίζουν τον περιαστικό-βιομηχανικό σταθμό της Σίνδου.

Στο διάγραμμα 54 παρατηρείται υψηλή συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων και των θεωρητικών συχνοτήτων ( $R^2=0,95$ ) και η πλειονότητα των σημείων συγκεντρώνεται πολύ κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η κατανομή Gamma περιγράφει με υψηλή αξιοπιστία τη στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων PM10. Οι αποκλίσεις εντοπίζονται κυρίως στις υψηλότερες συγκεντρώσεις, όπου εμφανίζονται επεισόδια αυξημένης ρύπανσης.

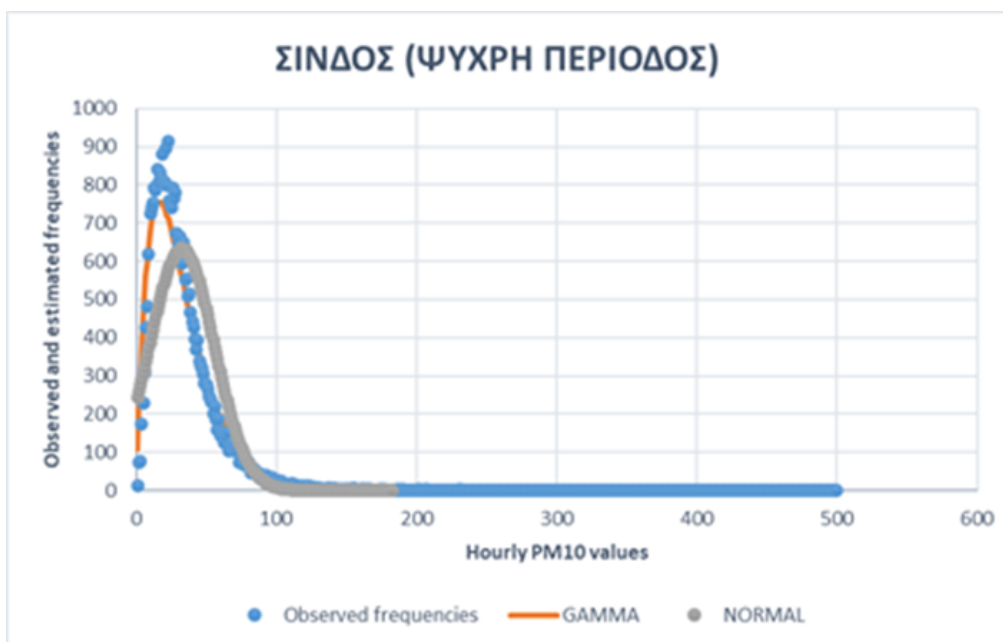
Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 55) οι περισσότερες συγκεντρώσεις PM10 κυμαίνονται επίσης περίπου μεταξύ 20 και 30  $\text{mg}/\text{m}^3$ , ενώ οι μέγιστες τιμές περιορίζονται περίπου στα 370  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμογή  $R^2=0,94$ , ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει χαμηλότερη απόδοση  $R^2=0,82$ .



Διάγραμμα 55 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)



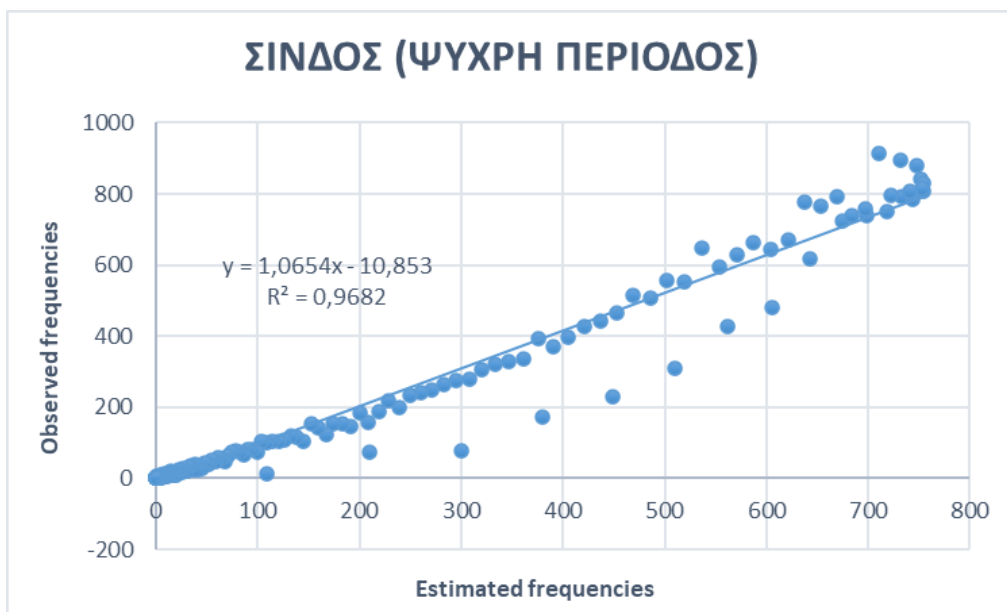
Διάγραμμα 56 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)



Διάγραμμα 57 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)

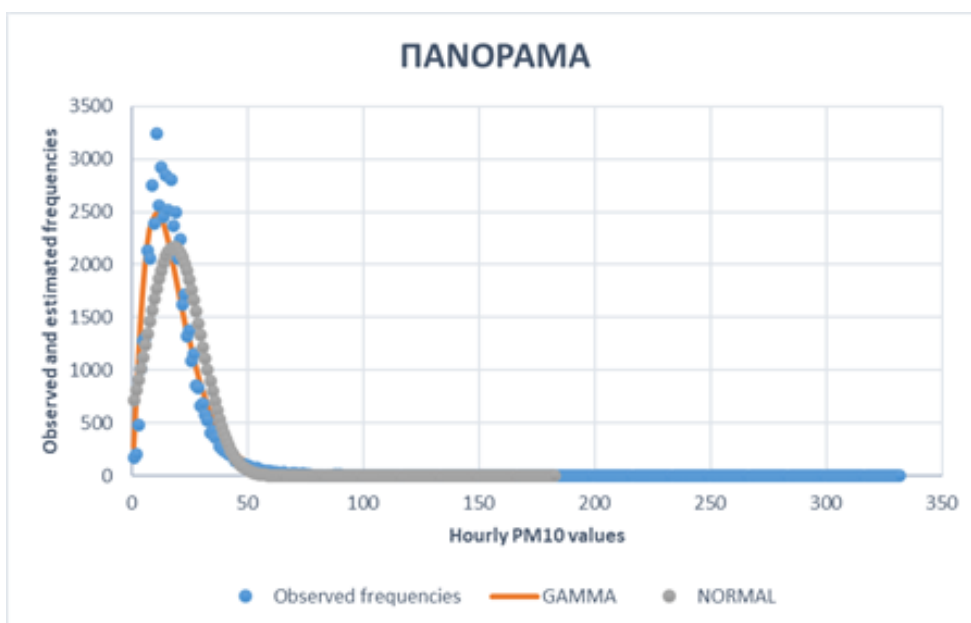
Σύμφωνα με το Διάγραμμα 57 κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται έντονη θετική ασυμμετρία, ενώ η δεξιά ουρά εκτείνεται έως περίπου 500 mg/m<sup>3</sup>, τιμή που σχετίζεται με την παρουσία επεισοδίων υψηλών συγκεντρώσεων PM10. Η κατανομή Gamma παρουσιάζει εξαιρετική προσαρμογή στα δεδομένα με  $R^2=0,97$  σε σχέση με την κανονική κατανομή με  $R^2=0,80$ . Η αυξημένη διασπορά των συγκεντρώσεων κατά την ψυχρή περίοδο αποδίδεται στη συνδυασμένη επίδραση της βιομηχανικής δραστηριότητας, της

οικιακής θέρμανσης και των δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών που περιορίζουν τη διασπορά των αιωρούμενων σωματιδίων. Η προσαρμογή της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των τριών περιόδων, παρά τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων.

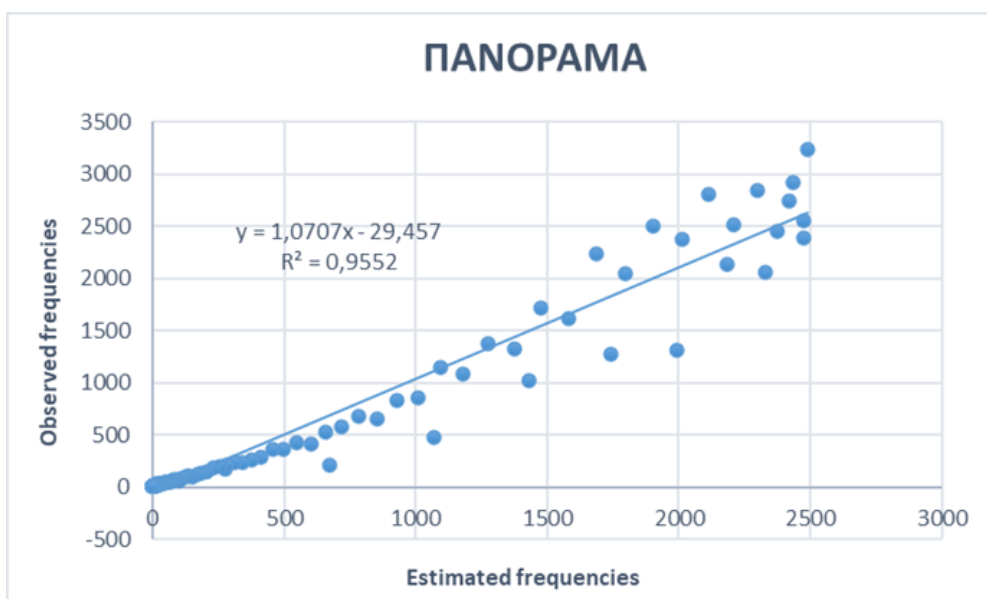


Διάγραμμα 58 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Σίνδος)

- Σταθμός μέτρησης Πανόραμα (Περιαστικός Υποβάθρου)



Διάγραμμα 59 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Πανόραμα)

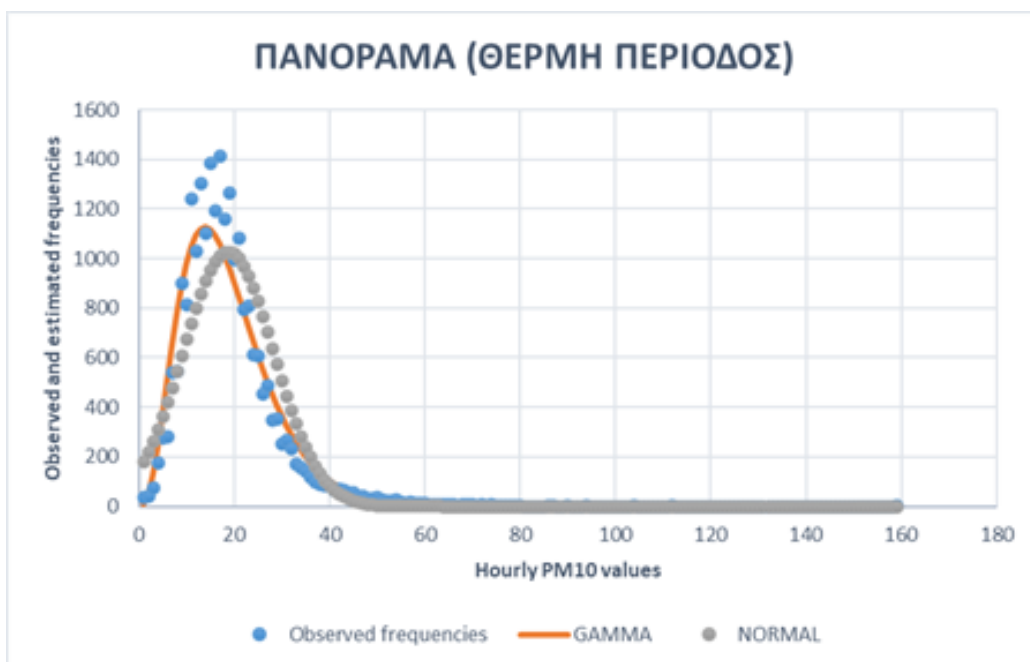


**Διάγραμμα 60** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Πανόραμα)

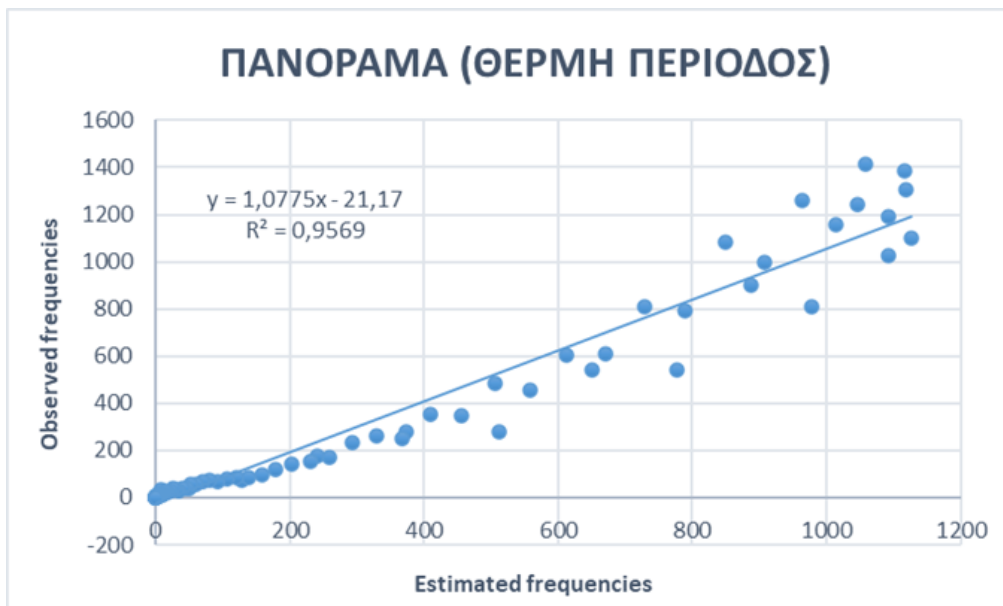
Ο σταθμός Πανόραμα, ως περιαστικός σταθμός υποβάθρου, παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων PM10 σε σχέση με τους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας και τους αστικούς-βιομηχανικούς σταθμούς, καθώς επηρεάζεται κυρίως από την περιφερειακή μεταφορά ατμοσφαιρικών ρύπων και λιγότερο από έντονες τοπικές πηγές εκπομπών. Η κατανομή των συγκεντρώσεων PM10 στον σταθμό Πανόραμα (Διάγραμμα 59) παρουσιάζει έντονη συγκέντρωση στις χαμηλές τιμές (περίπου 10–20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ενώ η συχνότητα μειώνεται προοδευτικά καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση σχηματίζοντας δεξιά ασύμμετρη κατανομή που εκτείνεται έως περίπου 320  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα με  $R^2=0,96$ , αποδίδοντας με ακρίβεια τόσο την κορυφή όσο και τη δεξιά ουρά της κατανομής, ενώ η κανονική κατανομή παρουσιάζει χαμηλότερη προσαρμογή  $R^2=0,88$  και υποεκτιμά την ασυμμετρία των συγκεντρώσεων.

Στο διάγραμμα συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων (Διάγραμμα 60) η πλειονότητα των σημείων κατανέμεται πολύ κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η κατανομή Gamma περιγράφει με αξιοπιστία τη στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων PM10 στον σταθμό Πανόραμα. Οι μικρές αποκλίσεις εντοπίζονται κυρίως στις υψηλότερες συγκεντρώσεις, όπου εμφανίζονται μεμονωμένα επεισόδια αυξημένης ρύπανσης.

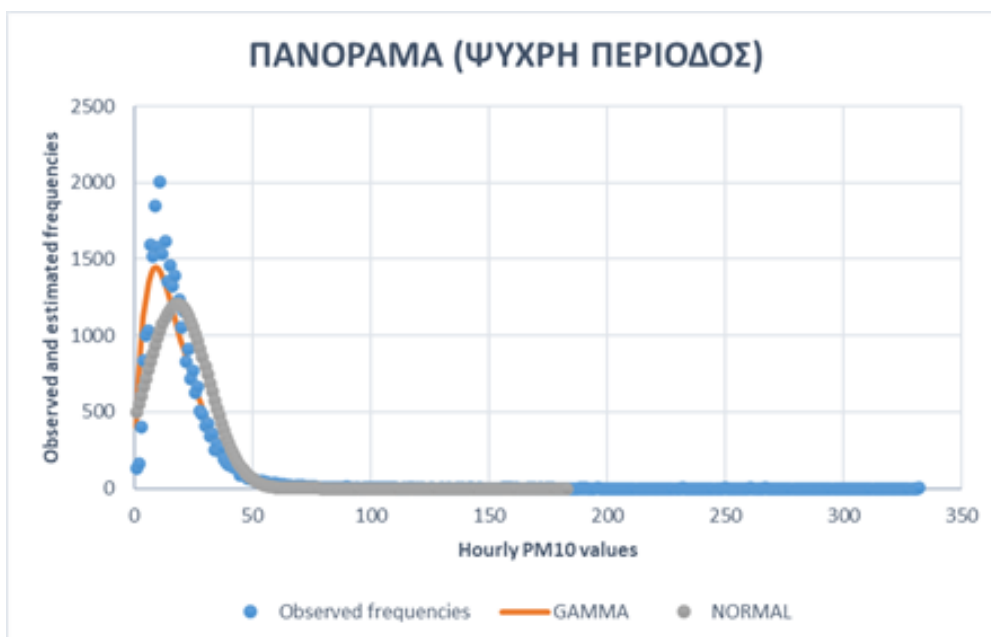
Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 61 και 62) η κατανομή εμφανίζει μικρότερη διασπορά σε σχέση με την ψυχρή περίοδο, γεγονός που σχετίζεται με τις ευνοϊκότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης και την απουσία εκπομπών από την οικιακή θέρμανση. Η κατανομή Gamma παρουσιάζει εξαιρετική προσαρμογή με  $R^2=0,96$  σε σχέση με την κανονική κατανομή με  $R^2=0,85$ .



Διάγραμμα 61 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Πανόραμα)

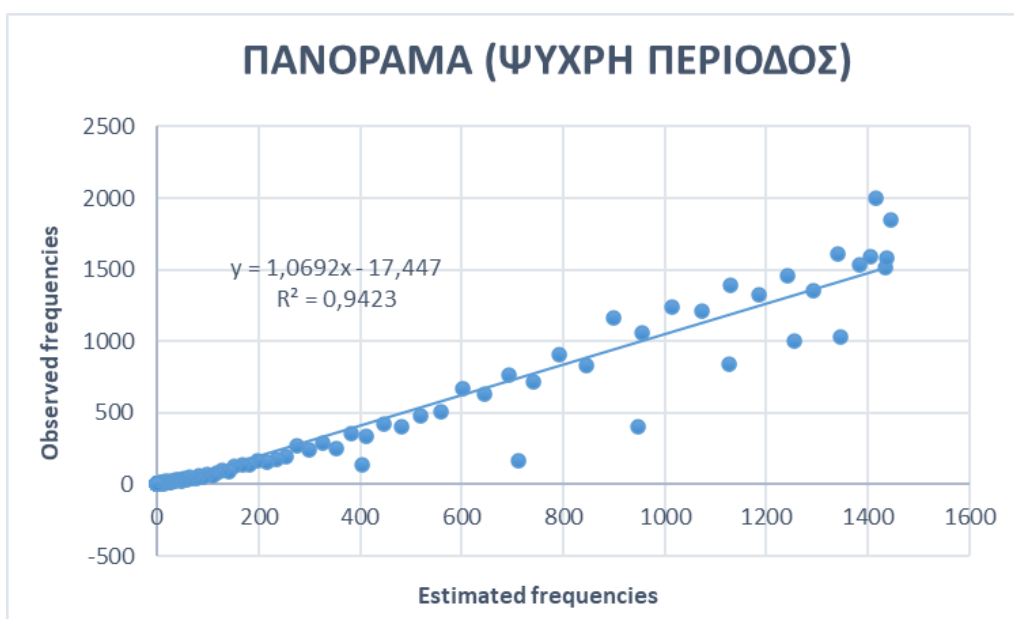


Διάγραμμα 62 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Πανόραμα)



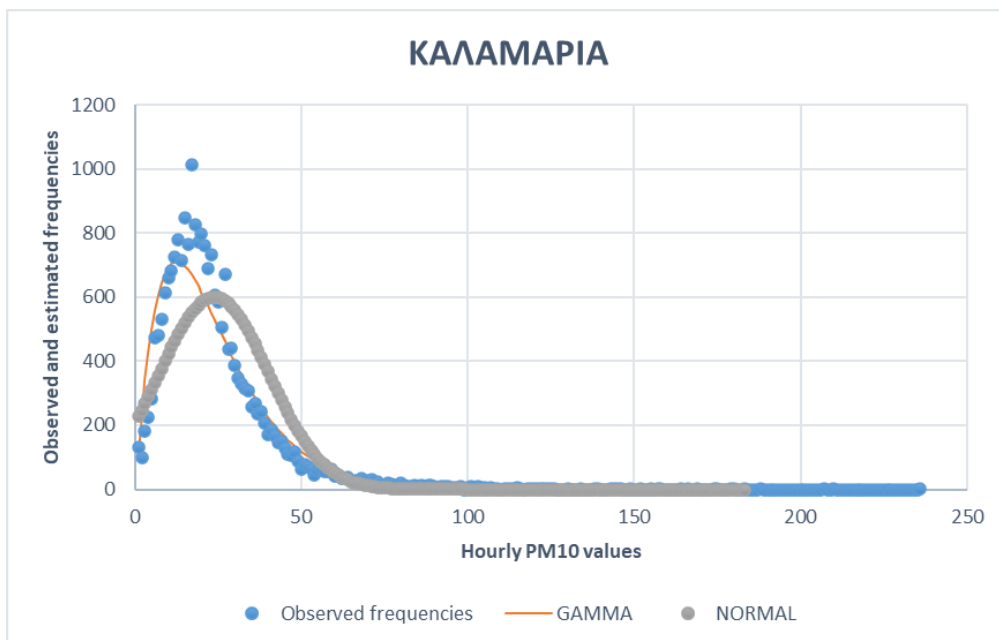
**Διάγραμμα 63** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Πανόραμα)

Κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων και συχνότερη εμφάνιση υψηλών τιμών PM10 που οφείλεται στις εκπομπές της οικιακής θέρμανσης και στις δυσμενέστερες συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς. Παρά την αυξημένη μεταβλητότητα, η κατανομή Gamma εξακολουθεί να περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα με  $R^2=0,94$ , ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει αισθητά χαμηλότερη προσαρμογή με  $R^2=0,81$ .

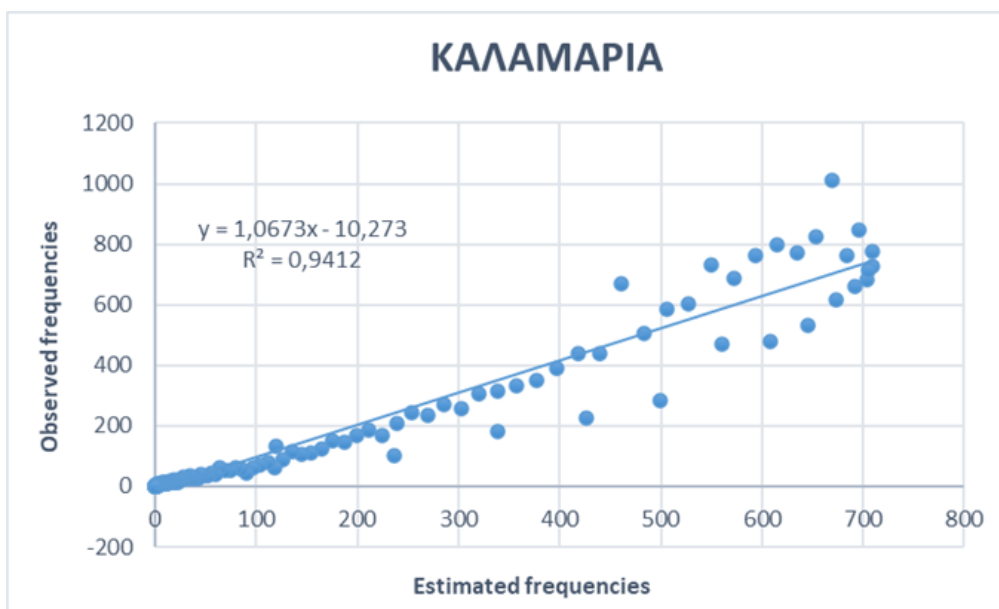


**Διάγραμμα 64** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Πανόραμα)

■ Σταθμός μέτρησης Καλαμαριά (Αστικός Υποβάθρου)



**Διάγραμμα 65** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά)



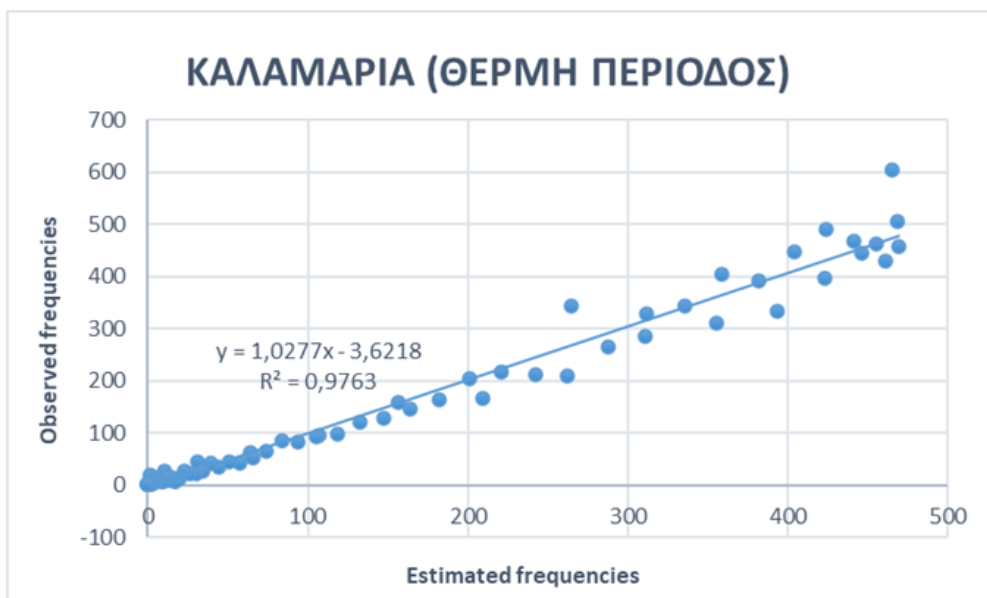
**Διάγραμμα 66** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Καλαμαριά)

Σύμφωνα με το διάγραμμα 65 οι συγκεντρώσεις PM10 στον σταθμό Καλαμαριά παρουσιάζουν τη μέγιστη συχνότητα περίπου στο εύρος 15–25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή εμφανίζει θετική ασυμμετρία ενώ η δεξιά ουρά εκτείνεται έως περίπου 220–230  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα ( $R^2=0,94$ ) σε σχέση με την

κανονική κατανομή ( $R^2=0,77$ ) και αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο την κορυφή όσο και την ασυμμετρία της κατανομής.



**Διάγραμμα 67** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)



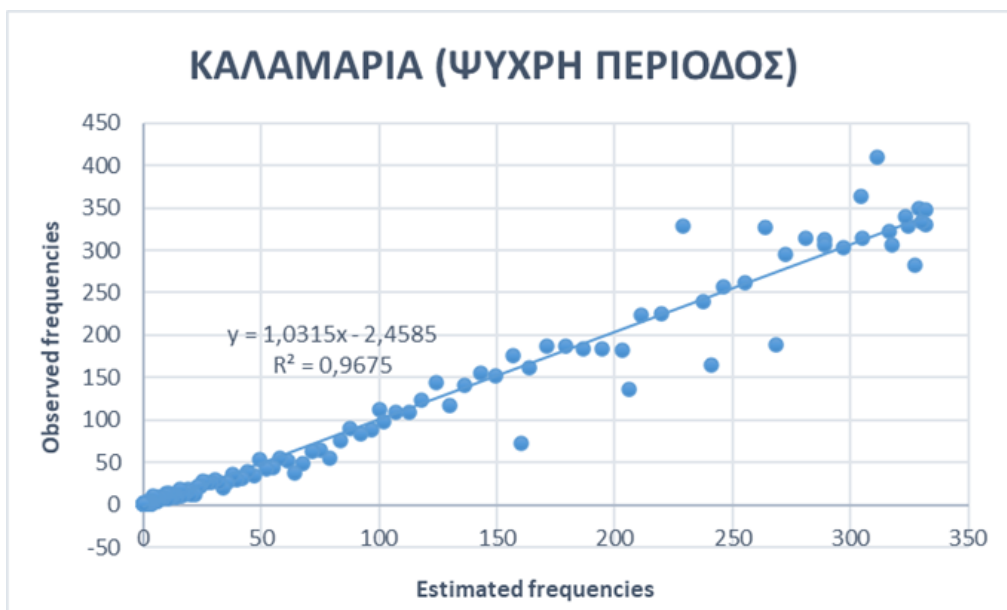
**Διάγραμμα 68** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)

Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 67) οι συγκεντρώσεις PM10 παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά και περιορισμένη εμφάνιση υψηλών τιμών με τη δεξιά ουρά να εκτείνεται έως περίπου  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η εμφάνιση μικρότερης διασποράς κατά τους θερινούς

μήνες είναι αποτέλεσμα της απουσίας επιβάρυνσης από την οικιακή θέρμανση και αποτέλεσμα των ευνοϊκότερων συνθηκών ατμοσφαιρικής ανάμιξης. Η κατανομή Gamma παρουσιάζει εξαιρετική προσαρμογή ( $R^2=0,98$ ) κατά τη θερμή περίοδο σε σχέση με την κανονική κατανομή ( $R^2=0,90$ ). Στο διάγραμμα 68 τα περισσότερα σημεία να συγκεντρώνονται πολύ κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης.



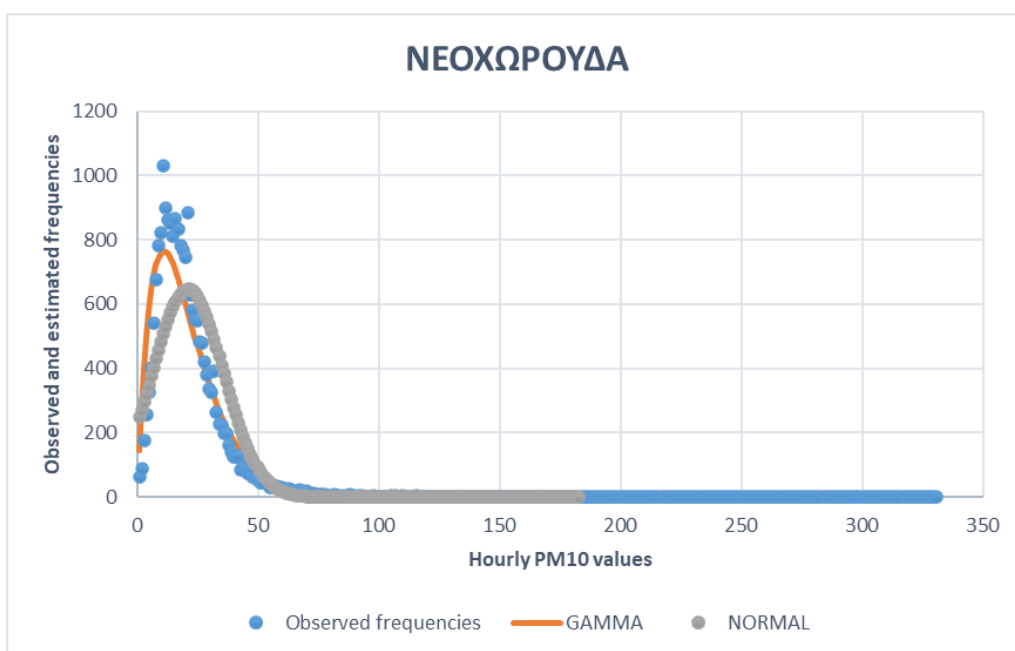
Διάγραμμα 69 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)



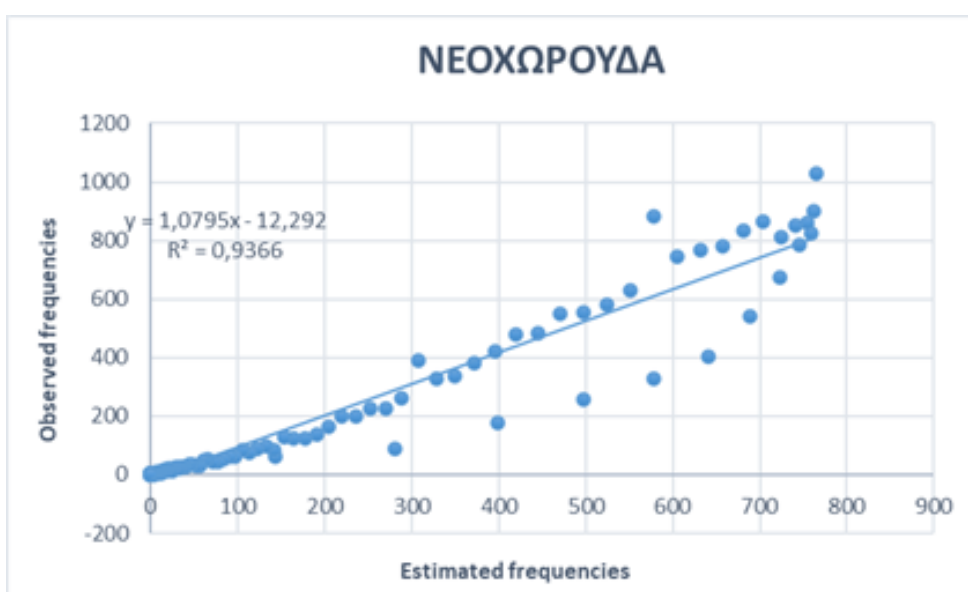
Διάγραμμα 70 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Καλαμαριά)

Κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων και συχνότερη εμφάνιση υψηλών τιμών PM10, που σχετίζονται με την επιβάρυνση από την οικιακή θέρμανση και τις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς των ρύπων. Η κατανομή Gamma εξακολουθεί να παρουσιάζει την καλύτερη προσαρμογή ( $R^2=0,97$ ) σε σχέση με την κανονική κατανομή κανονική κατανομή ( $R^2=0,84$ ).

- Σταθμός μέτρησης Νεοχωρούδα (Περιστικός Υποβάθρου)

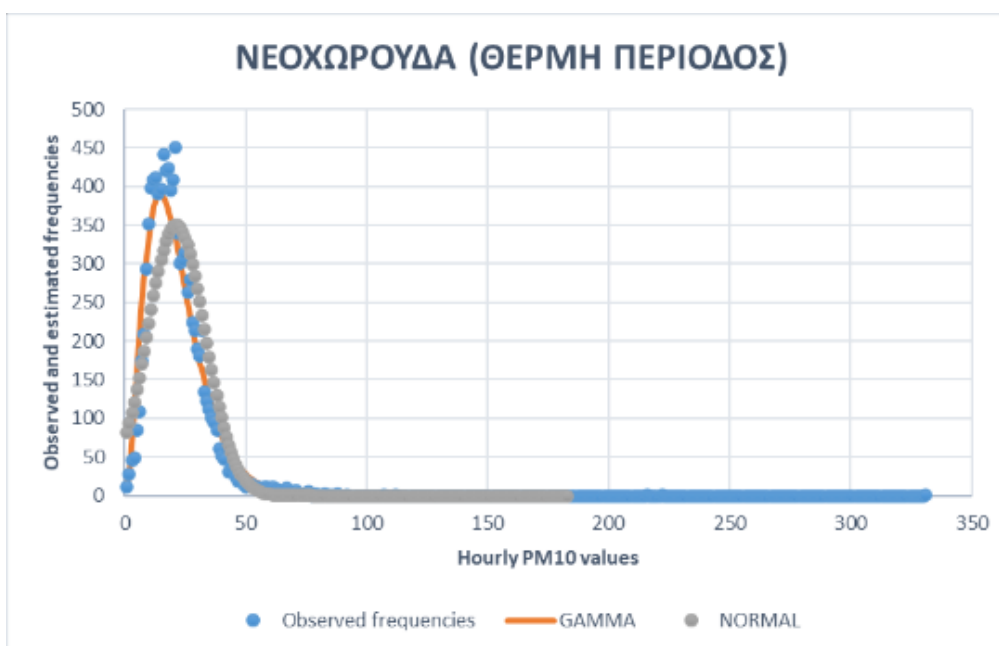


Διάγραμμα 71 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός Νεοχωρούδα)



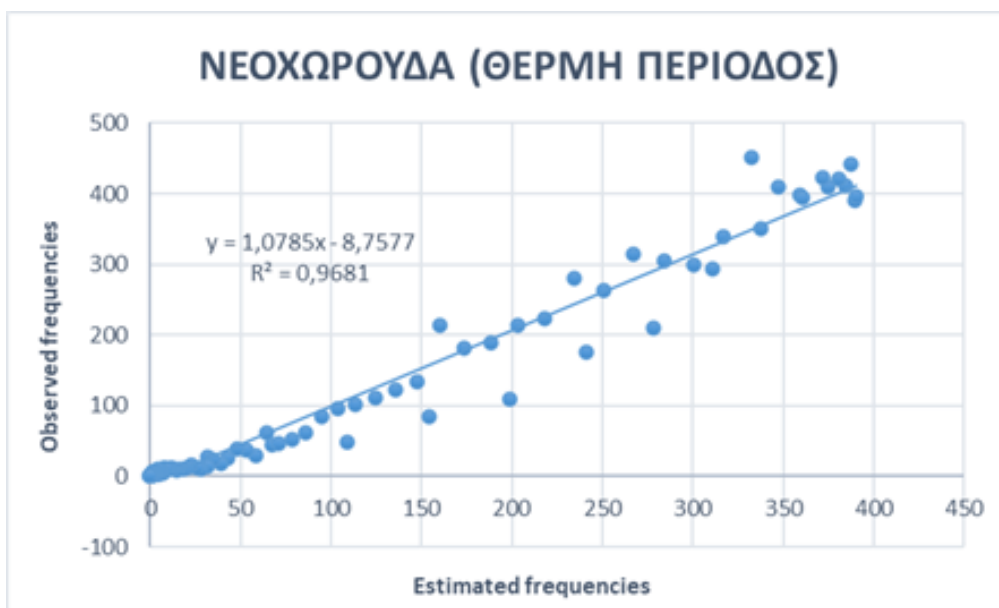
Διάγραμμα 72 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός Νεοχωρούδα)

Για τον σταθμό Νεοχωρούδα σύμφωνα με το Διάγραμμα 71 παρατηρείται έντονη θετική ασυμμετρία στις συγκεντρώσεις με τη μέγιστη συχνότητα εμφάνισης να εντοπίζεται στο εύρος 10-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και δεξιά ουρά που εκτείνεται έως περίπου 330-340  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα στις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις ( $R^2=0,94$ ) σε σύγκριση με την κανονική κατανομή ( $R^2=0,89$ ). Στο διάγραμμα 73 παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των σημείων βρίσκεται κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να εμφανίζονται στις υψηλότερες συχνότητες, όπου η επίδραση μεμονωμένων επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης γίνεται εντονότερη.



**Διάγραμμα 73 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Νεοχωρούδα)**

Κατά την θερμή περίοδο σύμφωνα με το Διάγραμμα 73 η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης εντοπίζεται στο εύρος 10-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και η δεξιά ουρά εκτείνεται έως περίπου 330-340  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma εξακολουθεί να περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα με  $R^2=0,94$ , ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει αισθητά χαμηλότερη προσαρμογή με  $R^2=0,81$ .



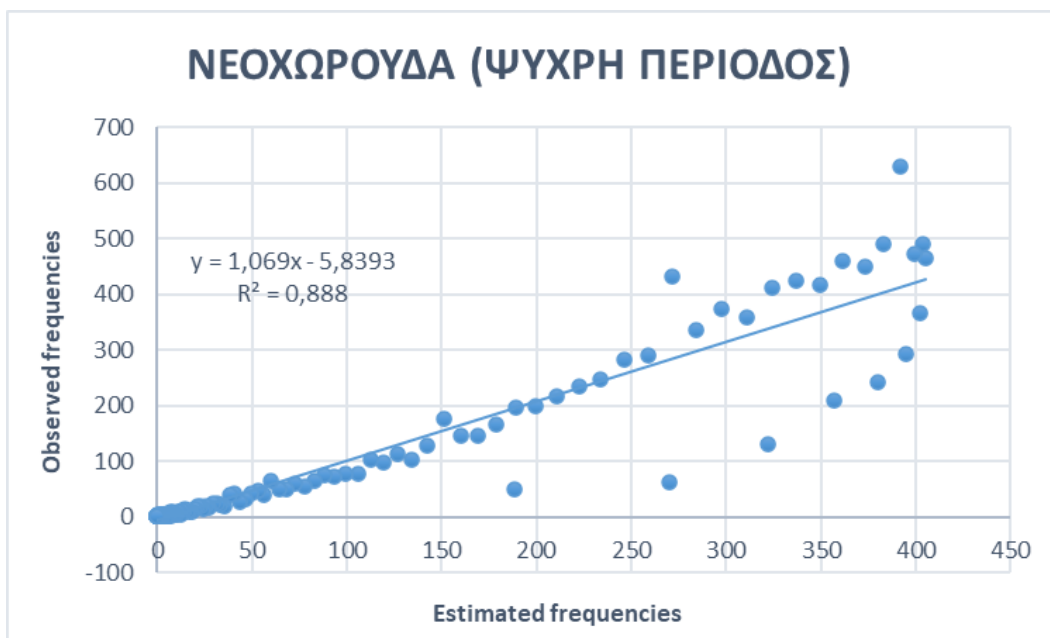
**Διάγραμμα 74** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός Νεοχωρούδα)

Κατά τη ψυχρή περίοδο οι συγκεντρώσεις PM10 παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά με τη δεξιά ουρά της κατανομής να εκτείνεται περίπου έως 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma προσαρμόζεται καλύτερα με  $R^2=0,97$  σε σχέση με την κανονική κατανομή  $R^2=0,88$ . Η πολύ καλή προσαρμογή μεταξύ θεωρητικών και παρατηρούμενων συχνοτήτων (Διάγραμμα 74) φανερώνει ότι η στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων είναι πιο ομοιογενής κατά τους θερινούς μήνες, καθώς μειώνεται η επίδραση των τοπικών εκπομπών.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εποχική ανάλυση του σταθμού Νεοχωρούδα είναι ότι οι συγκεντρώσεις PM10 εμφανίζονται υψηλότερες κατά τη θερμή περίοδο σε σχέση με την ψυχρή και διαφοροποιούνται από τη συνήθη εποχική συμπεριφορά που παρατηρείται στους περισσότερους σταθμούς. Η διαφοροποίηση αυτή ενδεχομένως σχετίζεται με τον χαρακτήρα του σταθμού ως περιαστικού υποβάθρου, καθώς το επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης της ευρύτερης περιοχής ενδέχεται να επηρεάζεται περισσότερο από την περιφερειακή μεταφορά αέριων μαζών παρά από μία κυρίαρχη τοπική πηγή εκπομπών.

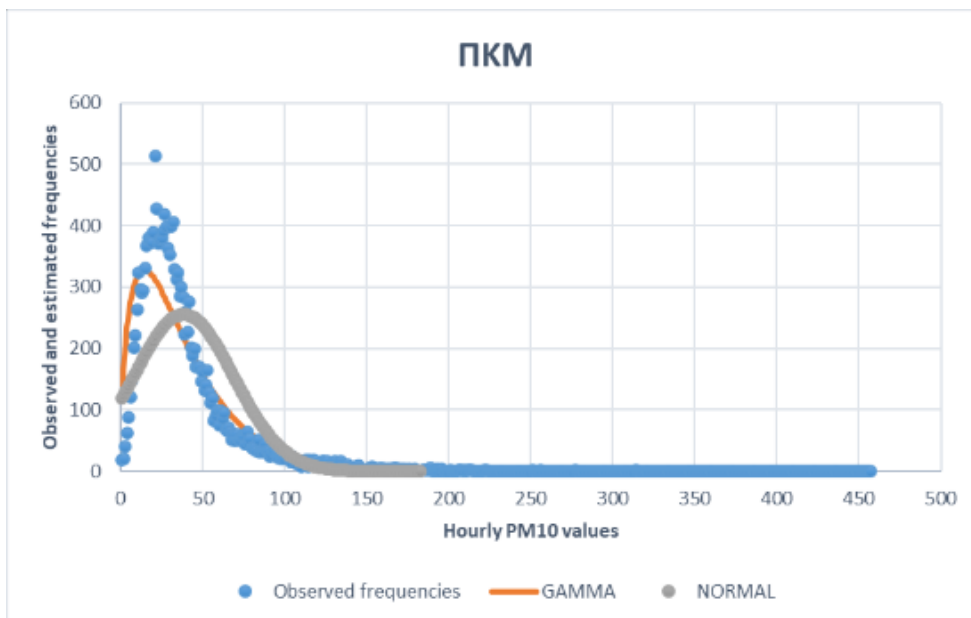


**Διάγραμμα 75** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Νεοχωρούδα)

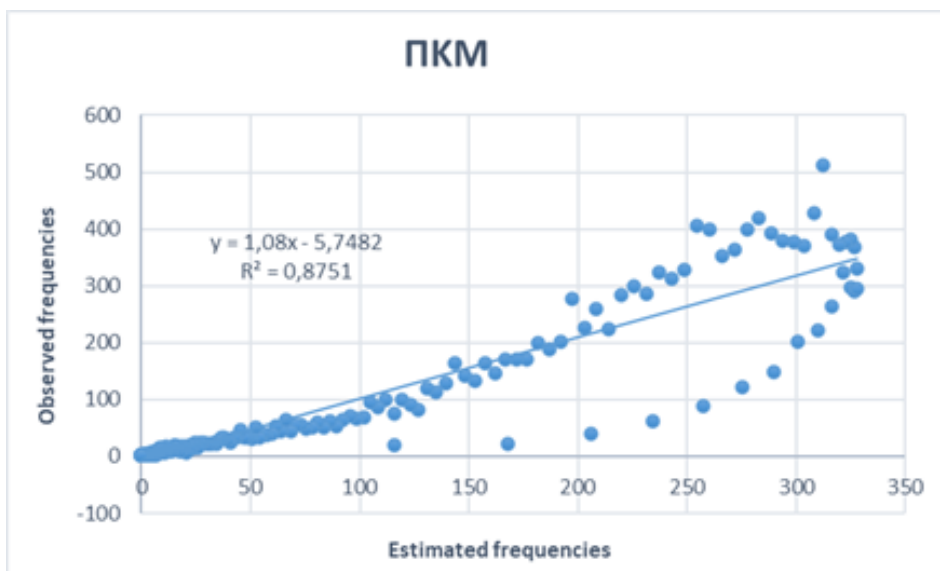


**Διάγραμμα 76** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός Νεοχωρούδα)

■ Σταθμός μέτρησης ΠΚΜ (Παρακολούθησης Αστικός Κυκλοφορίας)



Διάγραμμα 77 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma (Σταθμός ΠΚΜ)



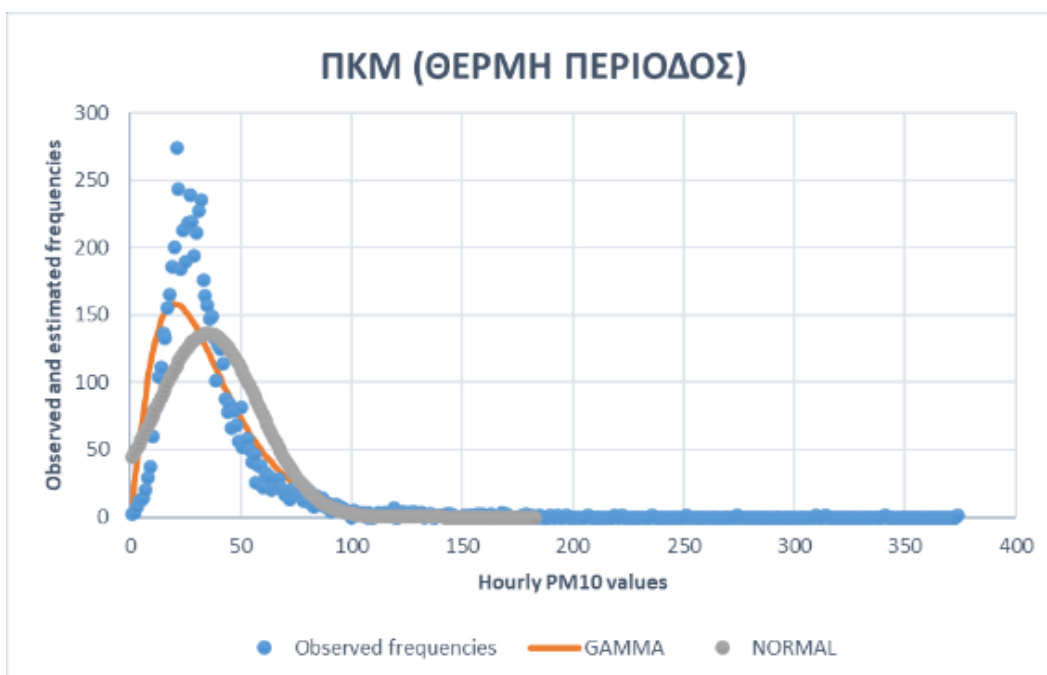
Διάγραμμα 78 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma (Σταθμός ΠΚΜ)

Στο Διάγραμμα 77 παρατηρείται ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων είναι έντονα δεξιά ασύμμετρη, με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης να εντοπίζεται στα  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  με δεξιά ουρά που εκτείνεται μέχρι περίπου τα  $460\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η κατανομή Gamma ακολουθεί καλύτερα τη μορφή των παρατηρούμενων δεδομένων, αποδίδοντας ικανοποιητικότερα τόσο την κορυφή της κατανομής όσο και τη δεξιά ουρά, ενώ η κανονική κατανομή εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις. Η υπεροχή της κατανομής Gamma επιβεβαιώνεται και

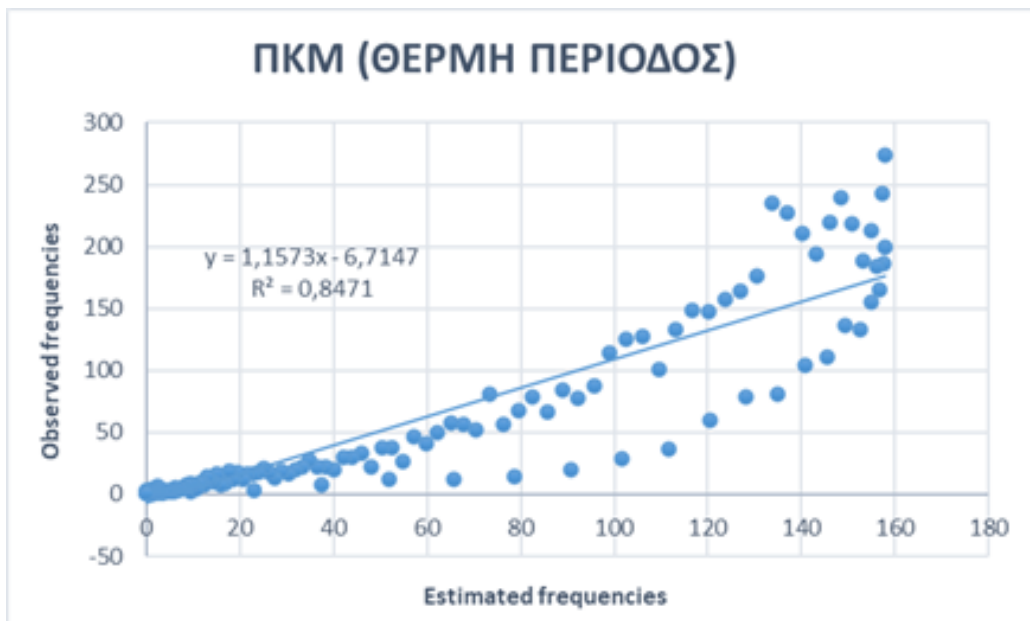
από τους δείκτες προσαρμογής, καθώς παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή  $R^2=0,88$  έναντι της τιμής  $R^2=0,71$  της κανονικής κατανομής. Στο διάγραμμα 78 παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις από τη γραμμή συσχέτισης που σημαίνει ότι συγκεντρώσεις χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη μεταβλητότητα στο σταθμό ΠΚΜ.

Κατά τη θερμή περίοδο (Διάγραμμα 79) οι συγκεντρώσεις PM10 παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά και περιορισμένη εμφάνιση υψηλών τιμών με τη δεξιά ουρά να εκτείνεται έως περίπου  $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η εμφάνιση μικρότερης διασποράς κατά τους θερινούς μήνες είναι αποτέλεσμα των ευνοϊκότερων συνθηκών ατμοσφαιρικής ανάμιξης. Παράλληλα, σημαντικό μέρος των PM10 αποτελείται από δευτερογενή σωματίδια που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω φωτοχημικών διεργασιών. Η κατανομή Gamma παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή ( $R^2=0,85$ ) κατά την θερμή περίοδο σε σχέση με την κανονική κατανομή ( $R^2=0,72$ ).

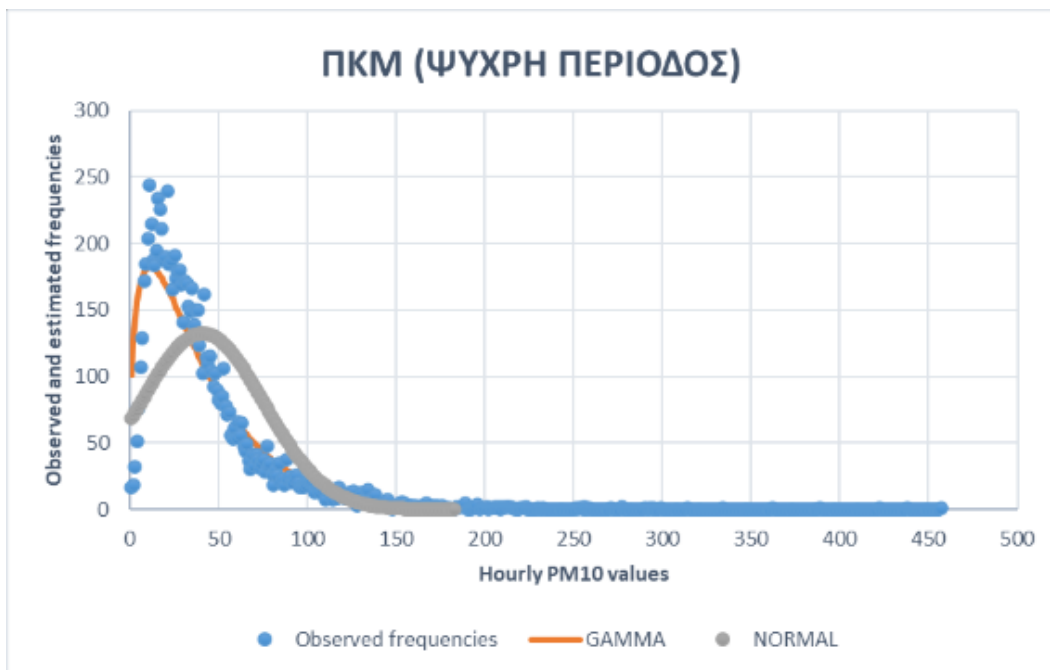
Κατά την ψυχρή περίοδο (Διάγραμμα 81 και 82) παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων και συχνότερη εμφάνιση υψηλών τιμών PM10, που σχετίζονται τις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς των ρύπων. Η κατανομή Gamma εξακολουθεί να παρουσιάζει την καλύτερη προσαρμογή ( $R^2=0,90$ ) σε σχέση με την κανονική κατανομή ( $R^2=0,66$ ).



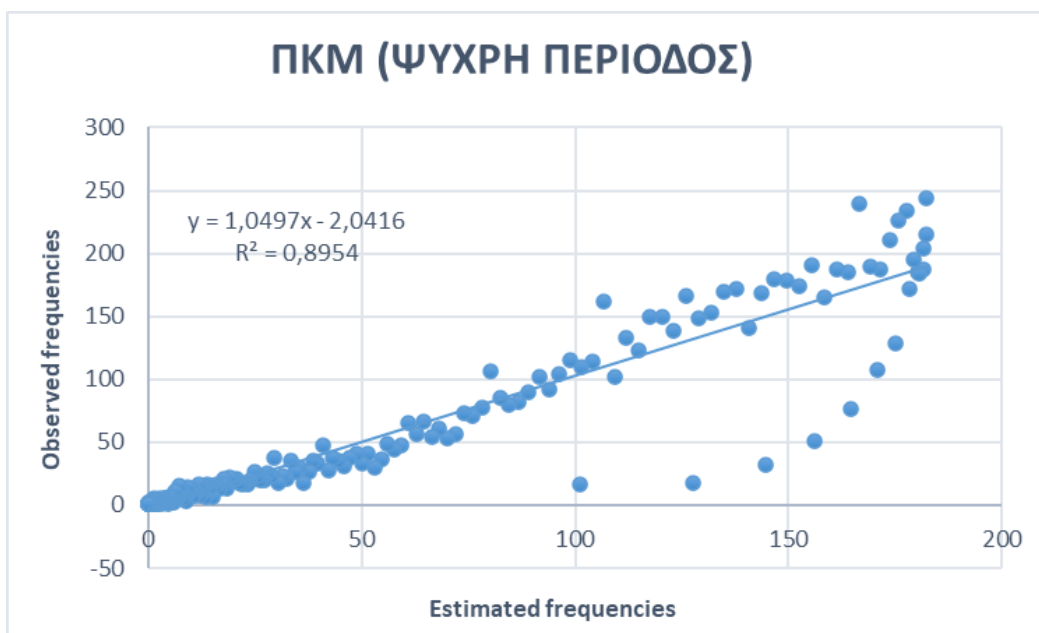
**Διάγραμμα 79** Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός ΠΚΜ)



Διάγραμμα 80 Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την θερμή περίοδο (Σταθμός ΠΚΜ)



Διάγραμμα 81 Παρατηρούμενες συχνότητες εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 και θεωρητικές συχνότητες της κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός ΠΚΜ)



**Διάγραμμα 82** Συσχέτιση παρατηρούμενων και θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10 της κατανομής Gamma κατά την ψυχρή περίοδο (Σταθμός ΠΚΜ)

### 3.10 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της κατανομής Gamma και της Κανονικής κατανομής στα ωριαία δεδομένα PM10 της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2017-2024

Η εφαρμογή της κατανομής Gamma και της κανονικής κατανομής στις ωριαίες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM10 για τη χρονική περίοδο 2017-2024 κατέδειξε ότι η κατανομή Gamma αποτελεί την καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των συγκεντρώσεων σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης της Θεσσαλονίκης. Σε όλους τους σταθμούς οι συγκεντρώσεις PM10 παρουσιάζουν έντονη θετική ασυμμετρία και εκτεταμένη δεξιά ουρά. Η μορφή και η στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων PM10 είναι περισσότερο σύνθετη σε σχέση με άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους, καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται τόσο από πρωτογενή όσο και από δευτερογενή σωματίδια. Τα πρωτογενή PM10 εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από πηγές όπως η οδική κυκλοφορία, οι βιομηχανικές δραστηριότητες, οι καύσεις και η επαναιώρηση της οδικής σκόνης, ενώ τα δευτερογενή σχηματίζονται μέσω χημικών μετασχηματισμών πρόδρομων αέριων ρύπων, όπως τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Η συμμετοχή των δευτερογενών διεργασιών αυξάνει περαιτέρω τη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων και συμβάλλει στη χαρακτηριστική ασυμμετρία των κατανομών.

Η διαφοροποίηση του βαθμού προσαρμογής μεταξύ των σταθμών σχετίζεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά χρήσης γης και τις κυρίαρχες πηγές εκπομπών κάθε περιοχής.

Οι σταθμοί υποβάθρου (Πανόραμα, Καλαμαριά και Νεοχωρούδα) εμφάνισαν γενικά μικρότερη μεταβλητότητα και υψηλότερες τιμές  $R^2$ , καθώς οι συγκεντρώσεις PM10 επηρεάζονται κυρίως από την περιφερειακή μεταφορά αέριων μαζών και τον σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων και λιγότερο από έντονες τοπικές εκπομπές. Ως αποτέλεσμα, οι συγκεντρώσεις μεταβάλλονται περισσότερο ομαλά στον χρόνο, παρουσιάζοντας μικρότερη διακύμανση σε σχέση με τους σταθμούς κυκλοφορίας ή τους βιομηχανικούς σταθμούς.

Αντίθετα, στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας (Αγία Σοφία, Σταυρούπολη και ΠΚΜ) και στους σταθμούς με βιομηχανική επιρροή (Κορδελιό και Σίνδος) παρατηρήθηκαν μεγαλύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων και συχνότερα επεισόδια υψηλών τιμών PM10. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται με τη συνδυασμένη παρουσία πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων. Εκτός από τις άμεσες εκπομπές που προέρχονται από τη βιομηχανία, την κυκλοφορία, τις καύσεις και την επαναιώρηση της οδικής σκόνης, σημαντική είναι και η συμβολή των δευτερογενών σωματιδίων που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα. Η συνδυασμένη δράση αυτών των μηχανισμών αυξάνει τη διασπορά των συγκεντρώσεων και οδηγεί σε συχνότερη εμφάνιση ακραίων επεισοδίων ρύπανσης.

Παρότι η πολυπλοκότητα των πηγών εκπομπών δυσκολεύει τη στατιστική περιγραφή των δεδομένων, η κατανομή Gamma εξακολουθεί να προσαρμόζεται σημαντικά καλύτερα από την κανονική κατανομή. Η σχετικά χαμηλότερη τιμή του  $R^2$  που παρατηρήθηκε στον σταθμό Κορδελιού αντανακλά κυρίως την πολυπλοκότητα των πηγών εκπομπών και όχι αδυναμία της κατανομής Gamma. Αντίθετα, ο περιαστικός-βιομηχανικός σταθμός Σίνδου παρουσίασε από τις υψηλότερες τιμές  $R^2$ , γεγονός που υποδηλώνει ότι, παρά τη σημαντική βιομηχανική επιβάρυνση, οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν περισσότερο σταθερή στατιστική συμπεριφορά.

Η εποχική ανάλυση ανέδειξε ότι κατά τη θερμή περίοδο οι συγκεντρώσεις PM10 εμφανίζουν γενικά μικρότερη διασπορά και περιορισμένη εμφάνιση υψηλών τιμών, γεγονός που αποδίδεται στις ευνοϊκότερες συνθήκες ατμοσφαιρικής ανάμιξης και αερισμού. Αντίθετα, κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται σημαντική αύξηση της μεταβλητότητας και συχνότερη εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων, εξαιτίας της οικιακής θέρμανσης, των θερμοκρασιακών αναστροφών και της μειωμένης ατμοσφαιρικής ανάμιξης και διασποράς των ρύπων. Οι επιδράσεις αυτές είναι ιδιαίτερα εμφανείς στους σταθμούς κυκλοφορίας και στους βιομηχανικούς σταθμούς, όπου οι τοπικές πηγές εκπομπών λειτουργούν αθροιστικά με τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες. Εξαιρέση αποτελεί ο σταθμός Νεοχωρούδα όπου παρατηρήθηκαν ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη θερμή περίοδο, εύρημα που πιθανόν συνδέεται με τον χαρακτήρα του σταθμού ως αστικού υποβάθρου και την επίδραση της περιφερειακής μεταφοράς αέριων μαζών.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι τόσο τα χαρακτηριστικά χρήσης γης όσο και η εποχική μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν τη στατιστική συμπεριφορά των συγκεντρώσεων PM10 στη Θεσσαλονίκη. Η κατανομή Gamma αποδεικνύεται το καταλληλότερο στατιστικό μοντέλο για την περιγραφή των ωριαίων συγκεντρώσεων PM10, καθώς αποδίδει με μεγαλύτερη

ακρίβεια την ασυμμετρία, τη μεταβλητότητα και την εμφάνιση ακραίων επεισοδίων που χαρακτηρίζουν τα δεδομένα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

### **3.11 Σύγκριση της προσαρμογής της κατανομής Gamma στα δεδομένα μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων**

Η σύγκριση της στατιστικής συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τη διαφορετική φύση των δύο ρύπων, τους μηχανισμούς σχηματισμού τους και την πολυπλοκότητα των διεργασιών που καθορίζουν τη συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα. Παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις η κατανομή Gamma παρουσίασε καλύτερη προσαρμογή στα εμπειρικά δεδομένα σε σχέση με την κανονική κατανομή, η ποιότητα της προσαρμογής δεν ήταν ίδια για τους δύο ρύπους. Συγκεκριμένα, η κατανομή Gamma παρουσίασε εμφανώς καλύτερη εφαρμογή στα δεδομένα του CO, ενώ στα PM10 παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και εμπειρικής κατανομής.

Το μονοξείδιο του άνθρακα αποτελεί έναν κυρίως πρωτογενή και σχεδόν αδρανή ατμοσφαιρικό ρύπο, ο οποίος εκπέμπεται άμεσα στην ατμόσφαιρα κυρίως από διεργασίες ατελούς καύσης, με σημαντικότερες πηγές την οδική κυκλοφορία, τη βιομηχανική δραστηριότητα και την καύση βιομάζας. Η συγκέντρωσή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση των τοπικών εκπομπών και από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν τη διασπορά του. Η σχετικά πιο συγκεκριμένη προέλευση των εκπομπών του έχει ως αποτέλεσμα πιο ομοιογενή στατιστική συμπεριφορά μεταξύ των σταθμών μέτρησης.

Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται και στην προσαρμογή της κατανομής Gamma, καθώς στα δεδομένα του CO η θεωρητική καμπύλη ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την εμπειρική κατανομή σχεδόν σε όλο το εύρος των συγκεντρώσεων. Η υψηλή συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών τιμών υποδηλώνει ότι η κατανομή Gamma μπορεί να περιγράψει αποτελεσματικά τη στατιστική μεταβλητότητα του ρύπου, καθώς οι συγκεντρώσεις του καθορίζονται κυρίως από τις πρωτογενείς εκπομπές και τις συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς.

Αντίθετα, τα αιωρούμενα σωματίδια PM10 αποτελούν έναν περισσότερο σύνθετο ατμοσφαιρικό ρύπο, καθώς η συγκέντρωσή τους προκύπτει από τη συνδυασμένη επίδραση πρωτογενών εκπομπών και δευτερογενών διεργασιών σχηματισμού. Εκτός από τις ανθρωπογενείς πηγές, όπως η κυκλοφορία, η βιομηχανική δραστηριότητα και η οικιακή θέρμανση, σημαντική συμβολή έχουν ο σχηματισμός δευτερογενών σωματιδίων μέσω χημικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα, η μεταφορά αερολυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις, επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης και φαινόμενα επαναιώρησης σωματιδίων από το έδαφος.

Η πολυπλοκότητα αυτή αντικατοπτρίζεται στη στατιστική συμπεριφορά των PM10, καθώς παρόλο που η κατανομή Gamma παρέχει καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με την

κανονική κατανομή, παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ της θεωρητικής καμπύλης και της πραγματικής κατανομής, ιδιαίτερα στις υψηλές συγκεντρώσεις. Οι αποκλίσεις αυτές σχετίζονται με την αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης επεισοδίων υψηλών τιμών, τα οποία προκαλούνται από διαφορετικούς μηχανισμούς, όπως μεταφορά σκόνης, δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες και δευτερογενή παραγωγή σωματιδίων. Επομένως, η πραγματική κατανομή των PM10 φαίνεται να είναι περισσότερο σύνθετη και πιθανώς δεν περιγράφεται πλήρως από μία μόνο θεωρητική κατανομή. Η επιλογή της Gamma αποτελεί μια επιστημονικά τεκμηριωμένη προσέγγιση, ωστόσο η διερεύνηση και άλλων ασύμμετρων κατανομών, όπως η Lognormal, θα μπορούσε να προσφέρει επιπλέον πληροφορίες για την καλύτερη στατιστική περιγραφή των συγκεντρώσεων PM10.

Παράλληλα, διαφορετική εμφανίζεται και η εποχική συμπεριφορά των δύο ρύπων. Για το CO, οι αυξημένες συγκεντρώσεις κατά την ψυχρή περίοδο συνδέονται κυρίως με την εντατικοποίηση των διαδικασιών καύσης για θέρμανση, την αυξημένη συχνότητα θερμοκρασιακών αναστροφών και τις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς. Αντίθετα, η εποχική μεταβλητότητα των PM10 είναι περισσότερο σύνθετη, καθώς επηρεάζεται τόσο από την αύξηση των εκπομπών κατά τη χειμερινή περίοδο όσο και από θερινά επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης, δευτερογενή σχηματισμό σωματιδίων και επαναιώρηση σκόνης από το έδαφος.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι η μορφή της στατιστικής κατανομής των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων δεν αποτελεί αποκλειστικά μαθηματικό χαρακτηριστικό των δεδομένων, αλλά αντανακλά τους φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς που καθορίζουν την παραγωγή, τη μεταφορά, τον μετασχηματισμό και την απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα. Η κατανομή Gamma αποδείχθηκε κατάλληλη για την περιγραφή τόσο του CO όσο και των PM10, καθώς και οι δύο ρύποι παρουσιάζουν θετική ασυμμετρία και μη κανονική συμπεριφορά. Ωστόσο, η πολύ καλύτερη προσαρμογή στην περίπτωση του CO υποδηλώνει μια πιο σταθερή και προβλέψιμη στατιστική συμπεριφορά, ενώ οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στα PM10 αναδεικνύουν την πολυπλοκότητα των διεργασιών που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις τους. Συνεπώς, η στατιστική ανάλυση δεν αποτελεί μόνο εργαλείο περιγραφής των δεδομένων, αλλά μπορεί να συμβάλει και στην κατανόηση των μηχανισμών που διαμορφώνουν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη σημασία της στατιστικής ανάλυσης για την κατανόηση της συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης. Μέσω της επεξεργασίας εκτεταμένων χρονοσειρών δεδομένων και της εφαρμογής της κανονικής και της κατανομής Gamma διαπιστώθηκε ότι οι κατανομές των συγκεντρώσεων παρουσιάζουν έντονη ασυμμετρία και σημαντική μεταβλητότητα, χαρακτηριστικά που δεν αποτυπώνονται επαρκώς από την κανονική κατανομή. Αντίθετα, η κατανομή Gamma εμφανίζεται η καταλληλότερη για την περιγραφή των εμπειρικών δεδομένων, όπως προκύπτει από τις τιμές των στατιστικών δεικτών προσαρμογής  $R^2$  και  $\chi^2$  και τις γραφικές απεικονίσεις. Επιπλέον, αναδείχθηκε η ύπαρξη σημαντικής χωρικής διαφοροποίησης μεταξύ των σταθμών μέτρησης, γεγονός που αντανακλά την επίδραση τοπικών παραγόντων, όπως οι πηγές εκπομπής και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Παράλληλα, η διερεύνηση της εποχικότητας κατέδειξε σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ θερμής και ψυχρής περιόδου, επιβεβαιώνοντας τον καθοριστικό ρόλο των μετεωρολογικών συνθηκών και των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων των ρύπων. Τα ευρήματα της μελέτης υπογραμμίζουν ότι η επιλογή της κατάλληλης στατιστικής κατανομής δεν αποτελεί απλώς μια μαθηματική διαδικασία, αλλά συνδέεται άμεσα με την κατανόηση των μηχανισμών εκπομπής, μεταφοράς και διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Συνολικά, η εργασία συμβάλλει ουσιαστικά στην ερμηνεία της ποιότητας του αέρα σε ένα σύνθετο αστικό περιβάλλον, παρέχοντας χρήσιμα εργαλεία για τη βελτίωση της μοντελοποίησης και την υποστήριξη αποτελεσματικότερων στρατηγικών περιβαλλοντικής διαχείρισης.

### 4.1 Αναπάντητα ερωτήματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι αφήνουν ανοιχτά σημαντικά ερευνητικά ζητήματα και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αρχικά, η ανάλυση περιορίστηκε στην εφαρμογή δύο μόνο θεωρητικών κατανομών (Κανονική και Gamma), χωρίς τη διερεύνηση εναλλακτικών στατιστικών μοντέλων, όπως η λογαριθμοκανονική ή η Weibull, οι οποίες έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα κατάλληλες στη διεθνή βιβλιογραφία για την περιγραφή συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων. Επιπλέον, η απουσία συστηματικής ενσωμάτωσης μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία, περιορίζει τη δυνατότητα ερμηνείας της επίδρασης των φυσικών διεργασιών στη διασπορά και τη συσσώρευση των ρύπων.

Παράλληλα, η ύπαρξη ελλিপών ή ασυνεχών χρονοσειρών δεδομένων σε ορισμένους σταθμούς μέτρησης ενδέχεται να επηρεάζει την αξιοπιστία της στατιστικής προσαρμογής και να εισάγει αβεβαιότητες στα αποτελέσματα. Τέλος η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως

σε ωριαία δεδομένα, χωρίς τη σύγκριση με άλλες χρονικές κλίμακες, όπως ημερήσιες ή εποχικές συγκεντρώσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να αναδείξουν διαφορετικά πρότυπα μεταβλητότητας.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης παρέχουν μια αξιόπιστη αλλά ταυτόχρονα μερική εικόνα της στατιστικής συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων, αναδεικνύοντας την ανάγκη για περαιτέρω πολυδιάστατη και διεπιστημονική προσέγγιση στο αντικείμενο της ποιότητας του αέρα.

## 4.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα ευρήματα και τους περιορισμούς της παρούσας μελέτης προκύπτουν σημαντικές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Η επέκταση της ανάλυσης σε επιπλέον στατιστικές κατανομές με στόχο την συγκριτική αξιολόγηση της καταλληλότητας τους. Παράλληλα η διερεύνηση της επίδρασης επιμέρους πηγών εκπομπής (κυκλοφοριακός φόρτος, βιομηχανική δραστηριότητα, οικιακή θέρμανση) στη μορφή των σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση μετεωρολογικών παραμέτρων θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο ολοκληρωμένα μοντέλα περιγραφής της ποιότητας του αέρα. Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες αστικές περιοχές μπορεί να συμβάλει στη γενίκευση των συμπερασμάτων και στην υποστήριξη αποτελεσματικότερων πολιτικών περιβαλλοντικής διαχείρισης.

## Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

Aydın, D. (2024). A comparison of the statistical distributions of air pollution concentrations in Sinop, Turkey. *Environment Protection Engineering*, 50(4).

<https://doi.org/10.37190/epe240403>

Chatzopoulou A. & Mavroidis I., (2025). Spatiotemporal Analysis of Air Pollutants in Thessaloniki, Greece, *Atmosphere* 2025, 16, 1057.

<https://doi.org/10.3390/atmos16091057>

Chatoutsidou, S. E., et al. (2025). PM10 Mass Concentration Characteristics in a Coastal Mediterranean Site. *Air Quality, Atmosphere & Health*.

European Environment Agency. (2024). Air quality in Europe 2024 report.

Ghazali, N. A., et al. (2014). Modeling ozone concentration using statistical distributions

Giavis, G. M., Kambezidis, H. D., & Lykoudis, S. P. (2009). Frequency distribution of particulate matter (PM10) in urban environments. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1–3), 99–109. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021819>

Gavriil, I., Grivas, G., Kassomenos, P., Chaloulakou, A., & Spyrellis, N. (2006). An application of theoretical probability distributions to the study of PM10 and PM2.5 time series in Athens, Greece. *Global NEST Journal*, 8(3), 241–251. <https://doi.org/10.30955/gnj.000401>

Gokhale, S., & Khare, M. (2007). Statistical behavior of carbon monoxide from vehicular exhausts in urban environments. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.008>

Hellenic Statistical Authority. Resident Population Census. 2024. Available online: [https://www.statistics.gr/documents/20181/18409455/population\\_VORIA\\_ELLAD\\_A\\_GR.pdf/f58eadeb-d65a-86c4-db62-f1ad87e0ecf0](https://www.statistics.gr/documents/20181/18409455/population_VORIA_ELLAD_A_GR.pdf/f58eadeb-d65a-86c4-db62-f1ad87e0ecf0) (accessed on 15 November 2024).

- Zoumakis, N. M., Kelessis, A. G., Petrakakis, M., Nikolaou, K., & Kozyraki, T. I. (1994). A microscale dispersion model for carbon monoxide emitted from motor vehicles. *The Science of the Total Environment*, 146–147, 401–407. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90262-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90262-3)
- Jaffar, N., et al. (2018). Statistical distributions of air pollutants in Malaysia
- Jaffar, M. I., Hamid, H. A., Yunus, R., & Raffee, A. F. (2018). Fitting statistical distribution on air pollution: An overview. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.23), 40–44. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.23.17088>
- Krishnamoorthy, K. (2006). *Handbook of statistical distributions with applications*. Chapman & Hall/CRC.
- Kassomenos, P., Lykoudis, S., & Chaloulakou, A. (2010). A tool for determining urban emission characteristics to be used in exposure assessment. *Environment International*, 36(5), 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.011>
- Kalabokas, P. D., Adamopoulos, A. D., & Viras, L. G. (2010). Atmospheric PM10 particle concentration measurements at central and peripheral urban sites in Athens and Thessaloniki, Greece. *Global NEST Journal*, 12(1), 71–83. <https://doi.org/10.30955/gnj.000691>
- Liora, N.; Kontos, S.; Tsiaousidis, D.; Salanova Grau, J.M.; Siomos, A.; Melas, D. Spatiotemporal Variability of Road Transport Emissions Based on Vehicle Speed Profiles—Impacts on Urban Air Quality: A Case Study for Thessaloniki, Greece. *Atmosphere* 2025, 16, 1337. <https://doi.org/10.3390/atmos16121337>
- Lu, H.-C. (2002). Study on statistical distributions of air pollutants in Taiwan
- Lu, H.-C. (2004). Urban air pollution distribution analysis in Taiwan
- Maciejewska, K., et al. (2015). Distribution analysis of air pollutants in Warsaw
- Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Korea & National Council on Climate and Air Quality of the Republic of Korea. (2021). Air pollution: An introduction to its causes, effects, and solutions.

- Maggos, T., Flocas, H., Soulos, T., Panagopoulos, P., Saraga, D. E., & Sarigiannis, D. (2025). The effect of atmospheric boundary layer meteorology in climate-related gases and VOCs concentrations over 3 European cities using an aerial platform.
- Moussiopoulos, N., Vlachokostas, C., Tsilingiridis, G., Douros, I., Hourdakakis, E., Naneris, C., & Sidiropoulos, C. (2009). Air quality status in Greater Thessaloniki Area and the emission reductions needed for attaining the EU air quality legislation. *Science of the Total Environment*, 407(4), 1268–1285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.038>
- Mermigkas, M., Topaloglou, C., Balis, D., Hase, F., & Dubravica, D. (2025). Local and regional enhancements of GHGs in Thessaloniki, inferred from ground-based FTIR measurements. *Atmospheric Research*, 319, Article 108035. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108035>
- Meirelles, M. G., & Vasconcelos, H. C. (2025). Physical–statistical characterization of PM10 and PM2.5 concentrations and atmospheric transport events in the Azores during 2024. *Earth*, 6(2), Article 54. <https://doi.org/10.3390/earth6020054>
- Noor, N. M., Tan, C.-Y., Ramli, N. A., Yahaya, A. S., & Md Yusof, N. F. F. (2011). Assessment of various probability distributions to model PM10 concentration for industrialized area in Peninsula Malaysia: A case study in Shah Alam and Nilai. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12), 2796–2811.
- Oguntunde, P. E., Odetunmibi, O. A., & Adejumo, A. O. (2014). A study of probability models in monitoring environmental pollution in Nigeria. *Journal of Probability and Statistics*.
- Ott, W. R. (1995). *Environmental statistics and data analysis*. Lewis Publishers.
- Panou, T., Topaloglou, C., Mermigkas, M., Balis, D., Dubravica, D., & Hase, F. (2023). Analyzing Four Years of Ground-Based Measurements of XCO<sub>2</sub> and XCO over Thessaloniki, Greece Using FTIR Spectroscopy. *Environmental Sciences Proceedings*, 26(1), 52. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026052>
- Papanastasiou D.K., Melas D., (2010). Application of PM10's Statistical Distribution to Air Quality Management-A Case Study in Central Greece. *Water Air Soil Pollut* (2010) 207:115–122 [DOI 10.1007/s11270-009-0123-8](https://doi.org/10.1007/s11270-009-0123-8)

- Papanastasiou, D. K., & Melas, D. (2010). Air quality management and PM10 concentrations in central Greece
- Petrakakis, M. J., Kelessis, A. G., Flocas, H. A., Zoumakis, N. M., Helmis, C. G., & Tsougas, M. A. (2006). *Meteorological conditions during air pollution episodes in Thessaloniki, Greece. Fresenius Environmental Bulletin*, 15(8b).
- Progiou, A., Liora, N., Sebos, I., Chatzimichail, C., Melas, D. (2023). Measures and Policies for Reducing PM Exceedances through the Use of Air Quality Modeling: The Case of Thessaloniki, Greece <https://doi.org/10.3390/su15020930>
- Poupkou, A.; Kontos, S.; Liora, N.; Tsiaousidis, D.; Kapsomenakis, I.; Solomos, S.; Liakakou, E.; Athanasopoulou, E.; Grivas, G.; Bougiatioti, A.; et al. Investigating the Role of Organic Aerosol Schemes in the Simulation of Atmospheric Particulate Matter in a Large Mediterranean Urban Agglomeration. *Sustainability* 2025, 17, 2619. <https://doi.org/10.3390/su17062619>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). Wiley.
- Tsiaousidis D. T., Liora N., Kontos S., Poupkou A., Akritidis D., Melas D. (2023). Evaluation of PM chemical composition in Thessaloniki, Greece based on air quality simulations. *Sustainability*, 15(13), 10034. <https://doi.org/10.3390/su151310034>
- Taylor, J. A., Jakeman, A. J., & Simpson, R. W. (1986). Modeling distributions of air pollutant concentrations—I. Identification of statistical models. *Atmospheric Environment*, 20(9), 1781–1789. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90127-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90127-7)
- Triantafyllou, E., & Biskos, G. (2012). Overview of the temporal variation of PM10 mass concentrations in the two major cities in Greece: Athens and Thessaloniki. *Global NEST Journal*, 14(4), 431–441.
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO.

Wilks, D. S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences (2nd ed.). Academic Press.

Xi, W.; Jie, C.R.; Heng, C.B.; Dong, K.H. Application of Statistical Distribution of PM10 Concentration in Air Quality Management in 5 Representative Cities of China. Biomed. Environ. Sci. 2013, 26, 638–646. [10.3967/0895-3988.2013.08.002](https://doi.org/10.3967/0895-3988.2013.08.002)

Yahaya, A. S., Ul-Saufie, A. Z., Hamid, H. A., Ahmat, H., & Ramli, N. A. (2013). Predicting CO concentration levels using probability distributions. International Journal of Engineering and Technology, 3(9), 900–905.

Ρεμουντάκη, Ε. (2010). Αέρας και ατμοσφαιρική ρύπανση. Αθήνα: WWF Ελλάς

Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της ατμόσφαιρας 2024 <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/>

<https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/carbon-monoxide>

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/carbon-monoxide-8-hour-mean-limit-value-for-the-protection-of-human-health-5>

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-of-air-pollutants-from>

<https://www.eea.europa.eu/el/help/sychnes-erotiseis/poioi-rypoi-prokaloy-n-kyrios-tin>

<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/eng>

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-air-quality-status-2024>

[http://intranet.emy.gr/emv/el/climatology/climatology\\_city?perifereia=Central%20Macedonia&poli=Thessaloniki\\_Mikra](http://intranet.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Central%20Macedonia&poli=Thessaloniki_Mikra)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.